



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE VIANA DO CASTELO

Catarina do Carmo Lopes

CONTRIBUIÇÃO PARA A ESTIMATIVA DA INCERTEZA EM ENSAIOS DE DESEMPENHO DE MISTURAS BETUMINOSAS

Estudo do Ensaio de Pista (“Wheel-Tracking”)

Tese de Mestrado

Gestão da Qualidade em Laboratórios

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Patrício António de Almeida Rocha

Trabalho efetuado sob a coorientação do
Professor Doutor José Manuel Coelho das Neves

Junho de 2014



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE VIANA DO CASTELO

Catarina do Carmo Lopes

CONTRIBUIÇÃO PARA A ESTIMATIVA DA INCERTEZA EM ENSAIOS DE DESEMPENHO DE MISTURAS BETUMINOSAS

Estudo do Ensaio de Pista (“Wheel-Tracking”)

Membros do Júri nomeado para apreciação da dissertação:

Professora Doutora Joana Maria Gomes dos Santos
Professor Doutor José Miguel Gomes Costa Veiga
Professor Doutor Patrício António de Almeida Rocha

Junho de 2014

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais e irmã, pelo apoio e amor incondicional em todos os momentos da minha via, principalmente nos de incerteza.

Agradecimentos

É com muita satisfação que expresso aqui os meus mais profundos agradecimentos a todos os intervenientes que tornaram possível a realização deste trabalho.

Ao meu orientador Sr. Professor Doutor Patrício Rocha pelo apoio, incentivo, disponibilidade e ter colaborado ativamente em todas as fases que conduziram à realização deste trabalho. E ainda pela sua amizade demonstrada ao longo desta etapa.

Ao meu coorientador Sr. Professor Doutor José das Neves expresso aqui a minha imensa gratidão pela ajuda, assim como pelos conhecimentos e orientações incondicionalmente transmitidos. E também pela oportunidade que me deu em participar na organização de um ensaio de comparação interlaboratorial (ECI), a nível nacional juntamente com a RELACRE que foi uma das mais-valias para este projeto.

À Sr. Professora Doutora Joana Santos pelo seu apoio e sua total disponibilidade em me ajudar sempre que precisei.

À minha grande amiga, mestre, e excelente profissional, Cláudia Ferreira, pelo apoio, motivação (principalmente nas alturas mais difíceis), pelos seus ensinamentos riquíssimos, pelos meios e condições que me proporcionou (enquanto foi minha chefe) de uma forma incondicional, pela sua colaboração ativa neste projeto que me foi dada incondicionalmente e pela sua imensa amizade em todas as alturas sem exceções.

À Gabriel Couto, pelos meios e condições que me disponibilizou e que foi fundamental para a concretização deste estudo.

Ao Sr. Professor José Veiga cuja ajuda na área da estatística foi essencial e enriquecedora.

Ao Paulo Ferreira, técnico de laboratório, que participou ativamente neste projeto de uma forma incansável e sempre tão disponível e indispensável para este estudo.

À Margarida Brás cuja ajuda, na fase inicial na introdução à estatística, foi fundamental.

À minha prima e amiga Carla que foi, de facto, a responsável por eu ter escolhido Engenharia Civil para a minha formação e que sempre me ajudou desde o início da minha carreira profissional.

Ao João pelo apoio moral e incentivo que nunca deixou de me dar.

E principalmente às pessoas a quem dedico este trabalho, os meus pais e irmã, que são os pilares da minha vida.

“Quanto mais motivos de interesse um homem tem, mais ocasiões tem também de ser feliz e menos está à mercê do destino, pois se perder um pode recorrer logo a outro.”

Bertrand Russell

Resumo

A tendência do aumento da exigência relativamente à confiabilidade de resultados de ensaios a materiais de construção e a dificuldade de que cada laboratório tem para decidir em como abordar e calcular a incerteza de medição, despertam a necessidade da implementação de metodologia / abordagem mais adequada e generalizada para o cálculo da incerteza de medição, que caracterize o melhor possível a dispersão dos valores que podem ser atribuídos a determinada mensuranda.

Progressivamente tem-se vindo a verificar o desenvolvimento de alguns estudos com a intenção de sistematizar metodologias / abordagens para avaliação das incertezas de medição por tipo de ensaio. A obrigação dos laboratórios de ensaios a materiais de construção fazerem um apuramento das fontes de incerteza que influenciem o resultado de um ensaio, e estimarem uma incerteza surgiu, dos requisitos exigidos pelo atual referencial normativo para a acreditação de laboratórios, EN ISO/IEC 17025: “Requisitos gerais de competência para laboratórios de ensaio e calibração”.

Desta forma, o principal objetivo do presente trabalho é contribuir para o desenvolvimento e validação de um procedimento de estimativa da incerteza mais adequado a ensaios de laboratório de desempenho de misturas betuminosas. Para o efeito, selecionou-se o ensaio de resistência à deformação permanente (vulgarmente denominado como ensaio de pista, *Wheel Tracking Test*) por ser o ensaio utilizado na marcação CE para avaliar a suscetibilidade à deformação das misturas betuminosas. A metodologia de estimativa da incerteza deste ensaio foi também baseada na análise dos valores da repetibilidade e reprodutibilidade resultantes de ensaios de comparação interlaboratorial.

Este trabalho realizado permitiu concluir a importância do estabelecimento de regras rigorosas para a execução deste ensaio, principalmente no que diz respeito à preparação, condicionamento dos provetes e o equipamento utilizado, visto o ensaio de pista ter vários fatores que possam contribuir para obtenção de um resultado dúbio face à complexidade do mesmo.

Assim, foi também possível apresentar algumas sugestões e recomendações para a diminuição dos fatores que podem contribuir para um resultado errado ou para obtenção de incertezas pouco confiáveis apresentadas pelos laboratórios de ensaio.

Palavras-Chave

Incerteza de medição

Fontes de incerteza

Mensuranda

Ensaio de comparação interlaboratorial

Repetibilidade

Reprodutibilidade

Mistura betuminosa

Ensaio de pista – Wheeltracking

Abstract

The tendencial rise in the demand related to the reliability of tests results of construction materials and the difficulty that each lab has to decide on how to approach and calculate the uncertainty of measurements, created the need of implementation of a methodology/approach more adequate and generalized for the calculation of measurements uncertainty, that characterize in the best way possible, the dispersion of values that can be attributed to a specific measurand.

Progressively, some studies have been developed, with the intention of systematizing methodologies/approaches to evaluate the measurement uncertainties by the type of tests. The obligation is that the construction materials test labs make a determination of the sources of uncertainty, that influence the result of a test, and to estimate an uncertainty, came from the demanded requirements by the actual standard reference for the accreditation of labs, EN ISO/IEC 17025: “General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.”

In this way, the main objective of the present work is to contribute to the development and validation of an estimation procedure of uncertainty more adequate to lab tests of the performance of bituminous mixtures. For that reason, it was selected the test of resistance to permanent deformation (Wheel Tracking Test) because it is the most used in CE marking to determining the susceptibility of bituminous materials to deform under load. The methodology of estimation of uncertainty of this test was based too in the analysis of values of repeatability and reproducibility resulting from the tests of inter-laboratorial comparison.

In the end, final considerations are presented, and will represent a synthesis of the work with the presentation of the main conclusions, proposals and recommendations for future works. The work carried out has allowed to understand the importance of the establishment of strict rules in the execution of this test, mainly in what concerns to preparation, conditioning of samples and the equipment used, because Wheel Tracking Test has many factors that can contribute for the achievement of a dubious result due to its own complexity.

Therefore, it has been also possible to present some suggestions and recommendations in order to reduce the factors that can contribute to a wrong result or to the obtention of less reliable uncertainties by the test labs.

Keywords

Measurement uncertainty

Sources of uncertainty

Measurand

Test of inter-laboratorial comparison

Repeatability

Reproducibility

Bituminous mixtures / mix asphalt

Wheel tracking test

Índice

Dedicatória	i
Agradecimentos.....	iii
Resumo	vii
Palavras-Chave.....	ix
Abstract	xi
Keywords.....	xiii
Índice	xv
Índice de Figuras	xix
Índice de Quadros	xxi
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos.....	4
1.3. Conteúdo do Trabalho e Metodologia.....	5
2. A Incerteza em ensaios e metodologia da sua avaliação.....	7
2.1. Generalidades sobre a avaliação da incerteza	7
2.2. Análise do procedimento de ensaio e especificação da mensuranda.....	11
2.3. Identificação das fontes de incerteza	11
2.4. Quantificação da incerteza padrão	13
2.5. Cálculo da incerteza expandida de medição	17

3. A incerteza nos ensaios de desempenho de misturas betuminosas	
Ensaio de pista (Wheel-Tracking)	21
3.1. Objetivo do ensaio de pista (Wheel-Tracking)	21
3.2. Estimativa da incerteza no ensaio de pista	25
3.3. Caso prático de aplicação	25
4. Estudo do ensaio de comparação interlaboratorial	
Ensaio de pista: Wheel-Tracking	29
4.1. Características da Mistura Betuminosa para realização do ECI.....	30
4.2. Trecho experimental da mistura betuminosa para obtenção dos provetes de ensaio	31
4.3. Provetes para ensaios em laboratório	33
4.4. Realização dos ensaios	35
5. Análise de resultados e estimativa da incerteza	37
5.1. Síntese dos resultados apresentados pelos laboratórios	37
5.2. Análise do desempenho dos laboratórios	54
5.3. Cálculo da repetibilidade e reprodutibilidade	62
5.4. Análise das fontes de incerteza	68
5.5. Resultados obtidos para a estimativa da incerteza para o ensaio de pista	
Wheel-Tracking.....	74
5.6. Reflexão da metodologia adotada e dos resultados obtidos	75
6. Considerações finais	77
6.1. Síntese do trabalho	77
6.2. Principais conclusões	78
6.3. Propostas / recomendações futuras	80

Bibliografia.....	81
Referências bibliográficas	83
ANEXOS– Estimativa da incerteza para o ensaio de pista – Wheel-Tracking	85

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Representação gráfica da distribuição retangular	14
Figura 3.1 – Ensaio de pista para determinação da resistência à deformação permanente	23
Figura 3.2 – Resistência á deformação permanente, equipamento pequeno, procedimento B acondicionamento ao ar, taxa de deformação em ensaios de pista, WTSAIR	26
Figura 4.1 – Trecho experimental	32
Figura 4.2 – Preparação para recolha dos provetes.....	33
Figura 4.3 – Preparação dos provetes.....	34
Figura 5.1 – Análise gráfica – Rdair Profundidade de rodeira após 10 000ciclos	42
Figura 5.2 – Análise gráfica – WTSair Taxa de deformação	42
Figura 5.3 – Análise gráfica – Baridade	43
Figura 5.4 – Resultados da Baridade (kg/m3) de todos os provetes por laboratório	45
Figura 5.5 – Resultados da profundidade de rodeira (mm) de todos os provetes por laboratório.....	46
Figura 5.6 – Gráfico de bigodes - Resultados da Baridade (kg/m3) de todos os provetes por laboratório.....	48
Figura 5.7 – Gráfico de bigodes - Resultados da profundidade de rodeira (mm) de todos os provetes por laboratório	49
Figura 5.8 – Análise Gráfica do Z-Score.....	56
Figura 5.9 – Critérios de Aceitação do CE/CTE – Brisa	58

Figura 5.10 – Resistência à deformação permanente, equipamento pequeno, procedimento B, acondicionamento ao ar, taxa de deformação em ensaio de pista	
WTS _{air} (EN 13108-1)	59
Figura 5.11 – Características e requisitos para as misturas betuminosas (EN 13108-1).....	60

Índice de Quadros

Quadro 4.1 – Resumo das características volumétricas e de estabilidade da mistura	30
Quadro 5.1 – Análise estatística do ECI	41
Quadro 5.2 – Teste Kruskal-Wallis, Ranks - Baridade.....	50
Quadro 5.3 – Teste Kruskal-Wallis, Test Statistics - Baridade	51
Quadro 5.4 – Teste Kruskal-Wallis, Ranks – Profundidade de Rodeira	51
Quadro 5.5 – Teste Kruskal-Wallis, Test Statistics – Profundidade de Rodeira.....	52
Quadro 5.6 – Teste LSD de Fisher – Comparação múltipla	53
Quadro 5.7 – Avaliação do Desempenho – Z-Score	55
Quadro 5.8 – Média das Médias da Taxa de Deformação WTSAIR (mm/103)	61
Quadro 5.9 – Análise Estatística – Ensaio realizado no âmbito do ECI	63
Quadro 5.10 – Análise Estatística – Ensaio realizado pelo laboratório Pivot	64
Quadro 5.11 – Análise Estatística – Todos os resultados com exceção do Laboratório L4	65
Quadro 5.12 – Valores de fidelidade de medição para os diferentes parâmetros resultantes do ensaio de pista - Wheel-Tracking.....	67
Quadro 5.13 – Dados resultantes da quantificação das fontes de incerteza ECI promovido pela RELACRE.....	71
Quadro 5.14 – Dados resultantes da quantificação das fontes de incerteza ECI promovido pela RELACRE com exceção dos resultados do L4.....	71
Quadro 5.15 – Dados resultantes da quantificação das fontes de incerteza Conjunto de todos os resultados com exceção dos resultados do L4.....	72

Quadro 5.16 – Dados resultantes da quantificação das fontes de incerteza	
Conjuntos dos resultados obtidos pelo laboratório pivot	72
Quadro 5.17 – Dados resultantes da quantificação das fontes de incerteza	
Conjunto dos resultados obtidos pelo laboratório pivot com fontes de incerteza	
identificadas tendo em conta a realidade do laboratório pivot.....	73
Quadro 5.18 – Dados resultantes da quantificação das fontes de incerteza	
Conjunto dos resultados obtidos pelo laboratório pivot com fontes de incerteza	
identificadas tendo em conta a realidade do laboratório pivot sem considerar os	
índices de repetibilidade e reprodutibilidade	73
Quadro 5.19 – Resumo do cálculo das estimativas da incerteza	74
Quadro 6.1 – Estimativa da incerteza – ECI promovido pela RELACRE	86
Quadro 6.2 – Estimativa da incerteza – ECI promovido pela RELACRE	
com exceção dos resultados do L4.....	87
Quadro 6.3 – Estimativa da incerteza – Conjunto de todos os resultados	
com exceção dos resultados do L4.....	88
Quadro 6.4 – Estimativa da incerteza – Conjunto de resultados obtidos	
pelo laboratório pivot	89
Quadro 6.5 – Estimativa da incerteza – Conjunto de resultados obtidos	
pelo laboratório pivot, tendo em conta as fontes de incerteza identificadas	
dentro da realidade do laboratório pivot.....	90
Quadro 6.6 – Estimativa da incerteza – Conjunto de resultados obtidos	
pelo laboratório pivot, tendo em conta as fontes de incerteza identificadas	
dentro da realidade do laboratório pivot sem considerar os índices de repetibilidade	
e reprodutibilidade.....	91

1. Introdução

1.1. Enquadramento

De acordo o Vocabulário Internacional de Metrologia, VIM (I. P. d. Q. IPQ, 2012), o termo incerteza de medição significa: “Parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a uma mensuranda, com base nas informações utilizadas”. Esta definição focaliza a gama de valores que o técnico acredita serem, com critério, atribuídos à grandeza submetida à medição.

No senso comum, a palavra incerteza está associada a um conceito que geralmente é de dúvida, no entanto, incerteza de medição não implica que se coloquem dúvidas sobre a confiabilidade de uma medição, mas pelo contrário, o seu conhecimento implica confiança no resultado, visto que o resultado de uma medição é uma estimativa ou aproximação do valor da mensuranda e só poderá ser considerado completo quando acompanhado da informação de uma incerteza.

Desde há muito tempo que o conceito de incerteza é totalmente conhecido e praticado pelos laboratórios na área da calibração. No entanto, na área dos ensaios, nomeadamente em materiais de construção, ainda não é uma prática inteiramente adotada.

Foi em 1993 que o “*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*”, elaborado pela ISO (ISO, 1995) com a colaboração de diversas entidades, estabeleceu formalmente as regras para avaliar e exprimir incerteza da medição numa vasta gama de medições.

A falta de legislação/normas que obriguem à informação do valor da incerteza faz com que ainda existam muitos responsáveis de laboratórios de ensaio que não têm consciência da real importância da estimativa de uma incerteza para os resultados obtidos nos seus ensaios, pois na realidade não a têm que a calcular porque não lhes é exigido, quer pelo cliente, legislação aplicável ou mesmo as respetivas normas de ensaio.

A estimativa da incerteza ainda é considerada como uma atividade demasiada trabalhosa e com uma relação custo/benefício pouco compensatória. Mas decididamente, não calcular a incerteza pode pôr em questão a análise de um resultado e até torná-lo inválido. A apresentação da estimativa da incerteza, nos ensaios realizados nos laboratórios que realizam ensaios a materiais de construção, é uma contribuição muito importante para o nível de confiança no momento do fornecimento dos resultados obtidos. Medições erradas podem conduzir-nos a decisões com consequências muito graves, como por exemplo custos financeiros elevados, desperdício de recursos materiais e humanos, etc.

É importante referir que os laboratórios acreditados, e que cumprem as exigências da NP EN ISO/IEC 17025 - Requisitos gerais de competência para laboratórios de ensaio e calibração, norma que especifica os requisitos gerais de competência para realizar ensaios e/ou calibrações, incluindo amostragem, (IPQ, 2005), devem ter definidas metodologias para a estimativa da incerteza, podendo ir do mais simples ao mais complexo método.

Existe uma diversidade de fatores que justificam a importância da estimativa da incerteza nos ensaios a materiais de construção, principalmente quantitativas. A acreditação de laboratórios, a certificação de produtos, a marcação CE de produtos, o controlo da qualidade, o cumprimento de caderno de encargos, as especificações técnicas ou o cumprimento da legislação são alguns exemplos que, quando um laboratório se encontra envolvido num processo de um deles, ocorre a necessidade do cálculo da incerteza dos ensaios para todas as partes interessadas (cliente direto, cliente final, fornecedor, organismo de acreditação, etc.).

A incerteza calculada por um laboratório ajuda os clientes principalmente em dois pontos: fornecer uma indicação quantitativa da confiabilidade do resultado do ensaio declarado e quantificar um nível de confiança para as declarações de conformidade do produto em questão sendo avaliado relativamente a especificações (EA, 2003).

Relativamente ao primeiro ponto podemos dizer que a incerteza é um indicador quantitativo da qualidade de medida: quanto menor a incerteza, calculada pelo laboratório, mais exata é o resultado da medição. Assim, no mercado, a incerteza deveria ser um parâmetro determinante para a qualificação de laboratórios.

Em relação ao segundo ponto, os critérios para aceitação e rejeição de um resultado de medição envolvem diretamente a análise da incerteza associada.

Para o cálculo da incerteza de um ensaio são consideradas diversas fontes de incerteza, como por exemplo equipamento, pessoal, etc. Assim, o cálculo da incerteza em ensaios também é importante quando utilizado para identificar possíveis reduções de custo com calibrações de equipamentos, na medida em que quando é evidenciado que esses equipamentos não contribuem significativamente para a incerteza total do ensaio, a periodicidade da calibração dos mesmos pode ser alargada ou mesmo deixar de ser mais realizada, (EA, 2003).

A estimativa da incerteza em ensaios também deve ser tida em conta como uma ferramenta para o aprimoramento de sistemas de medição o que vai ao encontro das exigências da EN ISO/IEC 17025, no que diz respeito à melhoria contínua.

No âmbito dos materiais de construção, a principal dificuldade, para os responsáveis dos laboratórios, de estimar a incerteza nos ensaios, prende-se principalmente ao facto de se utilizarem dados subjetivos para o respetivo cálculo. Também, o facto de não existir um método único normalizado e de simples implementação, provoca uma dificuldade acrescida.

A escolha do ensaio de Wheel Tracking para o tema deste trabalho deveu-se à possibilidade de se poder analisar a variabilidade dos resultados obtidos e de se estudar/verificar de que modo se poderá atuar para a contribuição do desenvolvimento de um método de estimativa da incerteza que se aproxime, o máximo possível, à realidade e que seja de simples implementação.

1.2. Objetivos

Este trabalho visa contribuir para um melhor conhecimento sobre a incerteza associada aos ensaios de laboratório de desempenho de misturas betuminosas, com particular incidência no caso do ensaio de resistência à deformação permanente (vulgarmente denominado como ensaio de pista, *Wheel Tracking*) que permite avaliar a suscetibilidade à deformação das misturas betuminosas. Este ensaio é realizado conforme o estipulado na norma EN 12697-22 e consiste na medição da profundidade de rodeira formada após sucessivas passagens de uma roda sobre um provete em condições de temperatura mais elevadas. Este ensaio permite obter informação acerca da resistência às deformações plásticas das misturas betuminosas.

A deformação permanente de misturas betuminosas é uma das patologias de pavimentos flexíveis que mais preocupa as autoridades rodoviárias (COST 333,1999 e TRB,2005) e um dos fatores que influencia a durabilidade do mesmo, principalmente em países com grande pluviosidade

Para caraterizar este parâmetro existem diversos ensaios laboratoriais, como os ensaios de Corte e Altura constante (RSST-CH) desenvolvidos nos Estados Unidos, os ensaios do acervo normativo europeu de compressão Uniaxial Cíclico, Triaxial Cíclico e o ensaio de *Wheel Tracking*. No entanto, para a implementação na prática dos ensaios referidos nas normas europeias é necessário ultrapassar alguns obstáculos, assim como a definição com rigor dos procedimentos e condições de ensaio e a definição dos valores limite de aceitação para os resultados.(Gardete, Picado-Santos, Pais, & Luzia, 2008)

Desta forma, estimar uma incerteza fidedigna para o ensaio que determina este parâmetro permitirá comparar com rigor os ensaios e seus resultados e estudar os pavimentos com base em resultados mais precisos.

Pretende-se ainda com este trabalho, analisar os valores da repetibilidade e reprodutibilidade resultantes dos ensaios de comparação interlaboratorial de forma avaliar se estes valores devem ser considerados, ou não considerados, no cálculo da estimativa da incerteza.

1.3. Conteúdo do Trabalho e Metodologia

O conteúdo deste trabalho encontra-se presente de uma forma sucinta no índice do mesmo. Trabalho este que consiste num contributo para o desenvolvimento de abordagem e cálculo da incerteza para o ensaio de pista, recorrendo à implementação e desenvolvimento de um ensaio de comparação interlaboratorial (ECI), a nível nacional, para obter resultados de repetibilidade e de reprodutibilidade dos parâmetros do ensaio em análise, que permitam a avaliação das respetivas incertezas.

De forma a facilitar a compreensão dos temas abordados neste trabalho, este subcapítulo apresenta a descrição do conteúdo de cada capítulo.

No capítulo “1. Introdução”, é efetuado um enquadramento do tema de forma a demonstrar a sua importância a nível nacional e internacional nos ensaios a materiais de construção. São também focados os objetivos deste trabalho e a metodologia utilizada para concretização do estudo pretendido.

Neste ponto ainda é feita uma descrição da apresentação da estrutura do trabalho.

No capítulo “2. A incerteza em ensaios e metodologia da sua avaliação” é efetuada uma breve descrição da importância da determinação incerteza em ensaios e possíveis metodologias adotadas para o cálculo das mesmas.

No capítulo “3. A incerteza nos ensaios de desempenho de misturas betuminosas – Ensaio de pista”, é descrito o objetivo do ensaio de pista e é também abordado o tema da necessidade da obtenção de uma metodologia rigorosa para o cálculo da incerteza para o para o ensaio de pista Wheel-Tracking, em misturas betuminosas, recorrendo a análise de resultados de repetibilidade e reprodutibilidade do ensaio.

O capítulo 4. “Estudo do Ensaio de Comparação interlaboratorial – Ensaio de Pista(Wheel-Tracking)” pormenoriza todo o trabalho efetuado para a realização do ensaio de comparação interlaboratorial (ECI) do ensaio de pista (Wheel-Tracking) proporcionado pela RELACRE, na medida em que permitiu que este ECI fosse realizado também como objeto de estudo para este trabalho. Neste capítulo são descritas todas as fases para a concretização do ECI, desde a fase de planeamento/programação até à fase da sua concretização.

No capítulo “5. Análise de resultados e estimativa da incerteza” são explanados todos os resultados obtidos para todos os laboratórios, bem como respetivas análises estatísticas e exploratórias recorrendo à ferramenta Statistical Package for the Social Sciences (SPSS). Também são apresentados os resultados obtidos da repetibilidade e reprodutibilidade para diferentes cenários. É ainda feita uma análise das fontes de incerteza aplicáveis em diferentes âmbitos. Em seguida apresentam-se os cálculos e análise efetuados para a estimativa da incerteza associada ao ensaio de pista (Wheel-Tracking). Este ponto será terminado com uma reflexão da metodologia adotada e dos resultados obtidos.

No último capítulo “6. Considerações finais” é exposta uma síntese do trabalho com apresentação das principais conclusões, propostas e recomendações para trabalhos futuros.

2. A Incerteza em ensaios e metodologia da sua avaliação

2.1. Generalidades sobre a avaliação da incerteza

A norma EN ISO/IEC 17025 tem como uma das suas diretrizes garantir a confiabilidade dos resultados de medição. Um dos seus requisitos, 5.4.6 “Estimativa da incerteza de medição”, impõe a necessidade de estimar a incerteza do resultado de forma uniformizada: “5.4.6.2 Os laboratórios de ensaio devem ter e aplicar procedimentos para estimar a incerteza de medição”.

De acordo com a EN ISO/IEC 17025, sempre que se estima uma incerteza de medição, devem ser considerados todos os fatores relevantes para uma determinada situação utilizando-se os métodos apropriados.

As tolerâncias, aplicadas ao produto na área da construção, cada vez mais apertadas para avaliação da sua conformidade, fazem com que o papel da incerteza seja um dado muito importante e cada vez mais considerado como um fator de garantia da qualidade.

Alguns autores consideram como fontes de incerteza, mas não obrigatoriamente, equipamentos e métodos utilizados, condições ambientais, operador, propriedades, condições do item ensaiado, etc., como também acham que a apresentação da incerteza estimada para uma medição deve ser incluída no respectivo relatório de ensaio quando necessário para a interpretação do resultado, quando relevante para a validade ou aplicação dos resultados ou quando a incerteza afetar a conformidade relativamente a um limite de uma especificação.

A partir dos anos 90 começaram a surgir documentos e eventos com o objetivo de criação de guias/metodologias para estimativa de incertezas, a seguir listam-se alguns documentos/eventos que definem metodologias para o respectivo cálculo::

- “*Guidelines for the expression of the uncertainty of measurement in calibrations*”, aprovado document WECC19, aplicável aos laboratórios integrados na rede WECC;
- Draft do GUM, em que grupo de trabalho ISO / TAG 4 / WG 3 publica o documento;
- Comunidade laboratorial de 24 países reúne-se para Workshop Eurolab (Barcelona e estabelece as bases para a uniformidade da avaliação da incerteza em ensaios;
- “*Guide the Expression of Uncertainty in Measurement*” (GUM);
- “*EAL-R2 – Expression of the Uncertainty of measurement in calibrations*”, que substitui WECC-19. Harmonizado com o GUM);
- “*EA-4/02 Expression of the Uncertainty of measurement in calibrations*”, reedição do EAL-R2, com exemplos práticos;
- “*EA-4/16 – Guidelines on the expression of uncertainty in quantitative testing*”

São vários os métodos existentes para cálculo da incerteza de medição, no entanto, esses métodos revelam-se muito complexos e difíceis de implementar num laboratório de ensaios físicos e mecânicos devido à necessidade de conhecimentos a alto nível, que o pessoal de um laboratório deverá ter na área da estatística, competência esta difícil de garantir na nossa realidade.

Como exemplos de métodos que um laboratório pode aplicar para o cálculo da incerteza de medição podem-se destacar os seguintes:

- O método GUM (*Guide the Expression of Uncertainty in Measurement*) – método este que é aceite na área dos ensaios, sendo que a implementação do GUM baseia-se na análise do modelo matemático da medição que inclui todas as contribuições relevantes para o ensaio ou calibração e a incerteza global é estimada pela lei de propagação da incerteza, seguindo a identificação e quantificação da incerteza individual dos fatores de influência, (Homerich da Jornada & Homerich da Jornada, 2007);
- O método Monte Carlo – está inserido no ramo da estatística chamado de estatística bayesiana, (Homerich da Jornada & Homerich da Jornada, 2007). Conforme já verificado em vários estudos comparativos realizados por diversas entidades, este método tem sido implementado com sucesso em áreas da metrologia nas quais metodologias mais simples provaram ser inadequadas, (Sousa et al., 2007);
- O método da Integração Numérica – Os métodos numéricos podem abranger teoricamente qualquer expressão analítica, sendo estes, métodos de ampla aplicação, no entanto, requerem conhecimentos muito consistentes e um nível avançado da matemática, o que torna quase sempre inviável a sua implementação na prática, (Homerich da Jornada & Caten, 2007).

O GUM foi o método seguido no desenvolvimento deste trabalho, apesar de vários estudos apontarem o método de Monte Carlo como um método simples que dispensa cálculos de derivadas parciais, e que até pode servir de validação de outros métodos mas que também tem como desvantagem de requerer a utilização de um software. O método GUM, apesar de ter a desvantagem de haver uma possibilidade (não regra) de levar a uma incerteza subestimada, tem a vantagem de permitir estimar a contribuição relativa das diferentes fontes de incerteza, possibilitando assim que se atue sobre as que afetam mais o resultado, o que para o laboratório de ensaio é de extrema importância e prioridade.

A metodologia de outros métodos alternativos, como a integração numérica, foi excluída pela sua complexidade e que para o trabalho em questão não seria relevante para o estudo, visto que o trabalho presente centra-se numa contribuição de abordagem e conhecimento da incerteza de medição

Com a aplicação do GUM ,as diretrizes seguidas para a estimativa da incerteza para o ensaio de pista (Wheel-Tracking) no presente trabalho, são de acordo com EA-4/16 EA guidelines on the expression of uncertainty in quantitative testing (EA, 2003) e com apoio também do *Guia RELACRE 25 - Estimativa da Incerteza de Medição em Ensaio de Materiais de Construção (CTR09, 2013)*.

Desta forma, o processo para estimativa da incerteza foi realizado de acordo com os passos seguintes:

1. Perceber o método de ensaio (especificação ou norma);
2. Especificação da mensuranda;
3. Identificação das fontes de incerteza;
4. Quantificação da incerteza padrão para cada fonte de incerteza;
5. Cálculo da variância (V_i) associada a cada uma das fontes de incerteza;
6. Cálculo da incerteza padrão (INC_{PAD}) para cada fonte de incerteza.
7. Determinação do número de graus de liberdade (N_{Li}) para cada fonte de incerteza
8. Cálculo do coeficiente de sensibilidade (C_i) para cada fonte de incerteza
9. Cálculo da incerteza padrão da grandeza objeto de medição (INC_{PAD})
10. Cálculo do número de graus de liberdade da grandeza objeto de medição (V_{ef})
11. Determinação do fator de expansão k
12. Cálculo da incerteza expandida de medição (INC)

A seguir é feita a descrição de cada um dos passos atrás mencionados de forma a transmitir uma melhor compreensão do procedimento a seguir.

2.2. Análise do procedimento de ensaio e especificação da mensuranda

Deverá ser feita uma reflexão profunda acerca do método de ensaio, que deve ser bem estudado e entendido para que os passos a seguir descritos sejam executados com o rigor exigido, de forma a obter-se um resultado final o mais fiável possível. Após esta reflexão deve-se especificar a mensuranda, isto é, a identificação da grandeza que está a ser medida, a maior parte das vezes consistindo no resultado final a indicar no relatório/boletim de ensaio e indicada no nome da norma ou especificação.

Sempre que a mensuranda resultar de um cálculo, expressão matemática que lhe está associada, esta deve ser claramente conhecida.

2.3. Identificação das fontes de incerteza

A identificação das fontes da incerteza é um passo, de facto, que deve ser considerado como muito importante para todos os métodos de ensaio quantitativos, quer seja ou não necessário reportar a incerteza de medição.

As fontes de incerteza devem ser independentes entre si evitando assim uma dupla contribuição para o cálculo da incerteza combinada, como se verificará mais à frente.

Como já transmitido anteriormente, o processo para identificação das fontes das incertezas exige uma análise aprofundada do método de ensaio em estudo. Estamos a falar de todas as grandezas de influência, não só as diretas mas também qualquer outra de natureza indireta, como por exemplo de natureza técnica, ambiental, humana, etc.

Para isso, é recomendável percorrer todo o método de ensaio, identificando cada passo a seguir listando todas as medições que é necessário realizar.

Sempre que a mensuranda resulta de um cálculo, a análise da expressão matemática que lhe está associada, pode ser também um bom começo para a identificação das medições que é necessário efetuar e que podem ser potenciais fontes de incerteza.

Uma das fontes de incerteza que deverá ser considerada como tal, é o arredondamento do resultado final, independentemente de ser ou não específico na norma de ensaio aplicável.

No entanto, os arredondamentos resultantes de medições ou leituras em passos intermédios da realização de um ensaio, geralmente não se consideram como fontes de incerteza, a partir do momento que a contribuição dos respetivos equipamentos de medição seja contemplada no balanço global da incerteza de ensaio (por exemplo através da consideração da incerteza de calibração de um equipamento), pelo que tal consideração consistiria assim numa redundância.

A precisão é um termo geral que pretende avaliar a dispersão de resultados entre ensaios independentes, repetidos sobre uma mesma amostra, amostras semelhantes ou padrões, em condições definidas.

Existem duas medidas extremas para avaliar esta dispersão, designadas por repetibilidade e reprodutibilidade. Desta forma, é de salientar que para uma estimativa da incerteza, após uma análise aprofundada do ensaio em questão, considerar a variância da repetibilidade e reprodutibilidade como fonte de incerteza, pode ser muito importante para análise de resultados de ensaios.

Erros grosseiros não devem ser considerados para a estimativa da incerteza de medição. Desta forma, é essencial seguir com rigor o método de ensaio para que este tipo de erros não sejam a causa de um resultado final incorreto.

Como garantia para a inexistência destes tipos de erros recomenda-se que a qualificação dos operadores seja rigorosa e a avaliação dos métodos também.

Quando os dados resultantes de um ensaio são utilizados para outro ensaio, então, a incerteza associada aos dados do primeiro ensaio deve ser considerada na estimativa da incerteza do segundo ensaio.

2.4. Quantificação da incerteza padrão

Para a quantificação da incerteza padrão associada a cada fonte de incerteza (u_i) é fundamental conhecer como é que cada passo e, por sua vez, o resultado final.

Para cada fonte de incerteza é necessário definir um dado intervalo de valores de ocorrência e a correspondente probabilidade associada a uma determinada distribuição estatística, o que pode ser estabelecido com base na classificação da sua forma da avaliação: tipo A ou B.

As incertezas são classificadas em duas categorias baseadas no respetivo método de avaliação.

Ambos os tipos de avaliação dão origem a distribuições estatísticas e as incertezas resultantes são quantificadas através de um desvio padrão:

- Incerteza padrão tipo A;
- Incerteza padrão tipo B.

Incerteza tipo A

A avaliação feita a partir da análise estatística de uma série de observações é uma avaliação tipo A. Para o caso de m observações, das quais se obtiveram os respetivos x_k resultados com média μ , a incerteza padrão u_i é o desvio-padrão experimental da média, dado pela expressão:

$$u_i = \sqrt{\frac{1}{m} \left[\frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (x_k - \mu)^2 \right]}$$

Incerteza tipo B

Uma incerteza tipo B é a que resulta de uma avaliação tipo B, ou seja, obtida por outro qualquer método que não corresponde a uma avaliação do tipo A.

Apesar de existirem várias distribuições probabilísticas adequadas às incertezas tipo B, no caso dos ensaios de materiais de construção, são as distribuições retangular e normal as de utilização mais corrente na estimativa da incerteza tipo B.

Sempre que é desconhecido onde poderá ocorrer um determinado valor da incerteza, é prudente atribuir à distribuição uma forma retangular onde a probabilidade de ocorrência de determinado valor dentro do intervalo estimado, com limites $-a$ e $+a$ (centrado no valor médio μ), é igual para todos os valores desse mesmo intervalo, conforme se apresenta na Figura 2.1.

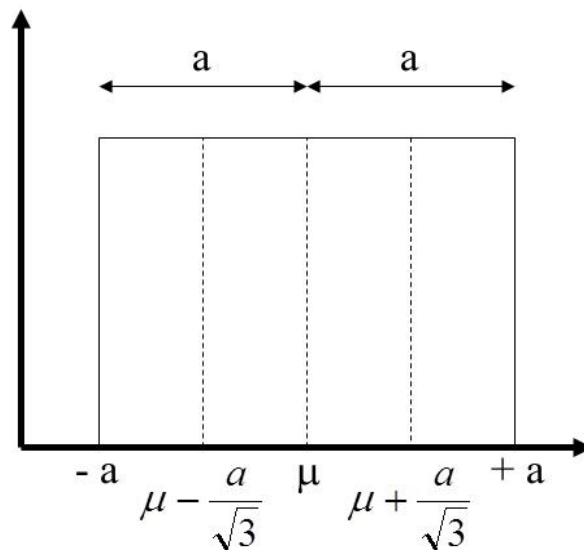


Figura 2.1 – Representação gráfica da distribuição retangular

De salientar, quando não for possível determinar uma distribuição adequada à fonte de incerteza, sugere-se a utilização da distribuição retangular.

Ainda a cada fonte de incerteza é preciso estimar o número de graus de liberdade (ν_i). Sendo que o número de graus de liberdade pode ser sensatamente atribuído à distribuição estatística considerada:

- Incerteza tipo A – O número de graus de liberdade associado à série de m observações é simplesmente m-1;
- Incertezas tipo B – podem ser considerados principalmente dois casos:
 - ✓ Um em que é possível, com segurança, atribuir à distribuição estatística escolhida uma probabilidade de ocorrência de 100% em que o número de graus de liberdade é infinito, que para efeitos de cálculo se pode traduzir em considerar o valor de 500 000;
 - ✓ O outro em que a probabilidade não é de 100%, o número de graus de liberdade a considerar é, por exemplo, calculado de acordo com a formulação de Welch-Satterthwaite, no entanto, como simplificação pode-se considerar 50 graus de liberdade.

Ainda de destacar, que a estimativa da incerteza relacionada com equipamentos calibrados, pode ser conseguida através da informação dada nos respetivos certificados de calibração ou ainda através dos valores especificados no respetivo método de ensaio para o equipamento em questão.

Outra incerteza poderá ser calculada a partir de valores de tolerância que se encontram presentes em outras normas, como por exemplo o caso das tolerâncias indicadas na norma ISO para dimensões de peneiros. Para estes casos, a incerteza deve ser calculada com base na distribuição retangular.

Existem fontes de incerteza que podem ser quantificadas claramente nos próprios métodos de ensaio. Como por exemplo o critério de massa constante na determinação do teor em água (0.1% da massa inicial do provetes).

Por vezes, também existe a necessidade do laboratório ter que recorrer à realização de ensaios adicionais para obtenção de mais dados relativamente aos valores a dotar para a estimativa da incerteza, como exemplo pode-se apontar a influência da temperatura ou outras questões ambientais.

Após a quantificação da incerteza padrão associada a cada fonte de incerteza deve ser realizado o cálculo da variância (V_i) associada a cada uma das fontes de incerteza segundo a expressão a seguir apresentada:

$$\text{Variância de } n \text{ medições: } V_i = V_S = \frac{S_s^2}{n};$$

$$\text{com } S_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - m_{\text{médio}})^2}{n-1}}$$

$$\text{Variância da distribuição normal: } V_i = V_N = (\text{Desvio-padrão})^2$$

$$\text{Variância da Distribuição Retangular Centrada: } V_i = V_R = \frac{(a_+ - a_-)^2}{12} = \frac{a^2}{3}$$

E calculada a incerteza padrão (INCPAD) para cada fonte de incerteza, através da expressão:

$$INC_{PAD_i} = \pm \sqrt{V_i}$$

Sendo determinado de seguida o número de graus de liberdade (N_{Li}) para cada fonte de incerteza:

Série de n medições -> N_{Li} = n-1

Distribuição normal ou retangular

Com probabilidade 100% -> N_{Li} = Infinito (nos cálculos utilizar o valor de 500.000)

Com probabilidade < 100% -> N_{Li} = 50

2.5. Cálculo da incerteza expandida de medição

- Cálculo do coeficiente de sensibilidade (C_i) para cada fonte de incerteza

$$C_i = \frac{\partial Y}{\partial X_i}$$

Nota: Se a função for linear, as derivadas parciais são iguais a 1.

- Cálculo da incerteza padrão da grandeza objeto de medição (INCPad)

$$INC_{Pad_Y} = \pm \sqrt{\sum_i (C_i^2 \times V_i)}$$

- Cálculo do número de graus de liberdade da grandeza objeto de medição (Vef)

Equação de Welch-Satterwaite:

$$V_{ef} = \frac{INC_{Pad_Y}^4}{\sum_{i=1}^n \frac{(C_i \times Inc_{Pad_i})^4}{NL_i}}$$

Nota. Se Vef não é um número inteiro, truncar Vef para o inteiro mais baixo.

- Determinação do fator de expansão k

Consultar quadro ou função do programa Excel.

- Cálculo da incerteza expandida de medição (INC)

$$INC = \pm K \times INC_{Pad_Y}$$

O valor da Incerteza Expandida de Medição é apresentado com o máximo de dois algarismos significativos.

Concluindo, uma grande vantagem da aplicação da metodologia apresentada, é que é de fácil compreensão por parte dos técnicos responsáveis dos laboratórios e consequentemente de simples implementação. Outra vantagem desta metodologia é que pode ser utilizada e adaptada a qualquer ensaio (quantitativo) de materiais de construção. Quando as condições de ensaio são bem controladas, os resultados obtidos para a estimativa da incerteza (com esta metodologia) são bastante confiáveis.

A sua maior desvantagem reside, para o caso do presente ensaio mas de uma forma geral, à identificação das fontes de incerteza e a determinação da sua quantificação. Este passo é fundamental para uma estimativa da incerteza fidedigna e para isso tem que se garantir que seja realizado com o maior rigor e por técnicos competentes.

Uma limitação que podemos encontrar poderá ser a falta de sensibilidade, dos técnicos afetos a esta atividade, para a identificação e quantificação das fontes de incerteza, sendo que esta falta de sensibilidade poderia ser minimizada ou mesmo colmatada com a existência de um documento informativo (a nível Nacional, por exemplo) com descrição de fontes de incerteza padronizadas que seriam atribuídas por tipo de ensaio e/ou equipamento.

3. A incerteza nos ensaios de desempenho de misturas betuminosas – Ensaio de pista (Wheel-Tracking)

3.1. Objetivo do ensaio de pista (Wheel-Tracking)

O ensaio de pista – “Wheel Tracking” – de acordo com a EN 12697-22 “Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 22: Wheel tracking” (CEN, 2007), tem como objetivo determinar a suscetibilidade que as misturas betuminosas apresentam relativamente à deformação sob a ação de uma determinada carga.

O ensaio é aplicável a provetes fabricados em laboratório ou a provetes recolhidos de um pavimento. Os provetes de ensaio são fixos num molde com a sua superfície alinhada com a extremidade superior do molde.

A suscetibilidade à deformação das misturas betuminosas é avaliada pela profundidade de rodeira formada pelas passagens sucessivas de uma roda carregada, a uma temperatura constante. Poderão ser utilizados três tipos de equipamentos em conformidade com a norma EN 12697-22: equipamentos de grandes dimensões, equipamentos de muito grandes dimensões e equipamentos de pequenas dimensões. Com os equipamentos de grandes dimensões e de muito grandes dimensões, os provetes são acondicionados ao ar durante o ensaio. Com os equipamentos de pequenas dimensões, os provetes são acondicionados ao ar ou em água.

Dependendo do tamanho do equipamento e do acondicionamento dos provetes, existe a possibilidade de realizar este ensaio segundo seis métodos diferentes.

O método mais utilizado (e que foi adotado neste trabalho) é o Método B com acondicionamento ao ar e com recurso ao equipamento de pequenas dimensões Figura 3.1).

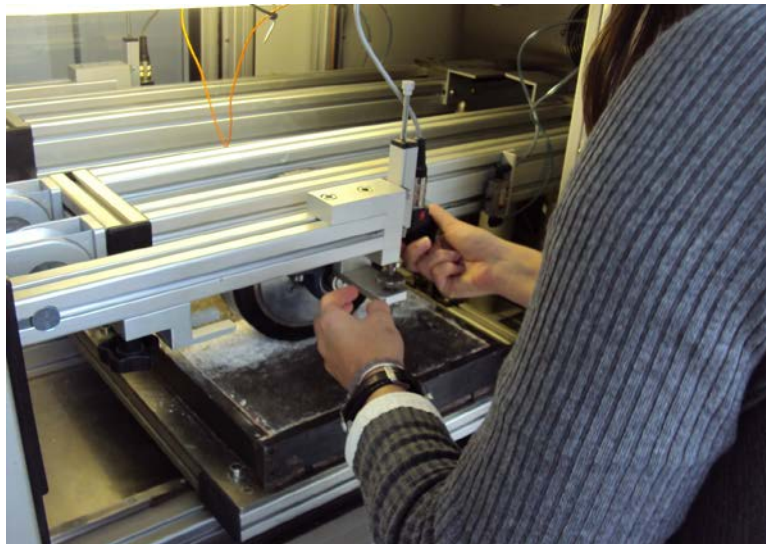


Figura 3.1 – Ensaio de pista para determinação da resistência à deformação permanente

Para a realização do ensaio pelo Método B ao ar são necessários dois provetes nos quais serão aplicados 10 000 ciclos de carga ($[(700 * \frac{w}{50}) \pm 10]N$), em w = largura do pneu.

O ensaio será considerado concluído após 10 000 ciclos ou quando se atingir uma profundidade de rodeira de 20 mm no provete, consoante o critério que ocorrer em primeiro lugar.

A informação obrigatória para os provetes de ensaio, em termos de resultados, em equipamentos de pequenas dimensões pelo Método B, é:

- Taxa de deformação em ensaio de pista, WTS_{AIR} , dos provetes de ensaio individuais;
- Taxa de deformação média em ensaio de pista, WTS_{AIR} , de cada grupo de dois provetes de ensaio;
- Percentagem de profundidade de rodeira, PRD_{AIR} , aos 10 000 ciclos dos provetes individuais;
- Média da percentagem de profundidade de rodeira média, PRD_{AIR} , aos 10 000 ciclos;
- Profundidade de rodeira, RD_{AIR} , aos 10 000 ciclos, de provetes individuais;
- Média da profundidade de rodeira, RD_{AIR} , aos 10 000 ciclos.

A taxa da deformação em ensaio de pista de acondicionamento ao ar é expressa pela seguinte equação:

$$WTS_{AIR} = \frac{d_{10000} - d_{5000}}{5} mm/10^3$$

Onde d_{10000} e d_{5000} , em mm, correspondem à profundidade de rodeira, respetivamente após 10000 e 5000 ciclos.

3.2. Estimativa da incerteza no ensaio de pista

O ensaio de pista, assim como todos os ensaios sobre misturas betuminosas, revela-se um ensaio muito sensível. Esta particularidade prende-se essencialmente com a complexidade e forma de rearranjo dos materiais constituintes da mistura betuminosa nos provetes que os contêm, que na realização dos ensaios, podem refletir diferenças de resultados entrando em conflito com as especificações definidas, por exemplo na norma NP EN 13108-1, (I. P. d. Q. IPQ, 2011).

Também o processo de fabrico, nomeadamente o processo de compactação das misturas betuminosas, tanto em laboratório como “in-situ”, pode influenciar significativamente os resultados obtidos. (Gardete et al., 2008).

Assim, a título de exemplo e no sub-paragrafo seguinte, será explicado o atrás descrito, clarificando as variáveis e dificuldades encontradas pelos laboratórios nacionais de uma forma geral. Desta forma, serão apresentados resultados de ensaios interlaboratoriais realizados em Portugal que evidenciarão estas dificuldades.

3.3. Caso prático de aplicação

A grande maioria das misturas betuminosas produzidas e aplicadas em Portugal, destinadas a estradas, aeroportos e outras áreas de circulação, estão especificadas na norma de produto NP EN 13108-1 -*Misturas betuminosas- Especificações dos materiais- Parte 1: Betão betuminoso* (I. P. d. Q. IPQ, 2011) .Para além de outras características que poderão ser declaradas pelos produtores a partir desta norma, como as características volumétricas, a granulometria a percentagem de ligante solúvel, é possível declarar e especificar a resistência à deformação permanente das mesmas. Assim, no ponto 5.2.6 desta norma, no quadro 8 “Resistência à deformação permanente, equipamento pequeno, procedimento B acondicionamento ao ar, taxa de deformação em ensaios de pista, WTS_{AIR} ”, estão especificadas categorias a adotar pelo produtor face aos resultados dos ensaios obtidos no ensaio de pista, a partir da tabela da Figura 3.2

Inclinação Wheel Tracking	Categoria
Máxima, mm por 10 ³ ciclos de carga	WTS _{AIR}
0,03	WTS _{AIR50,03}
0,05	WTS _{AIR0,05}
0,07	WTS _{AIR0,07}
0,10	WTS _{AIR0,1}
0,15	WTS _{AIR0,15}
0,30	WTS _{AIR0,30}
0,40	WTS _{AIR0,40}
0,50	WTS _{AIR0,50}
0,60	WTS _{AIR0,60}
0,80	WTS _{AIR0,80}
1,00	WTS _{AIR1,00}
Categoria não requerida	WTS _{AIRNR}
^a Para cargas por eixo < 13 t.	

Figura 3.2 – Resistência á deformação permanente, equipamento pequeno, procedimento B
acondicionamento ao ar, taxa de deformação em ensaios de pista, WTS_{AIR}

De acordo ainda com o referencial normativo europeu, mais concretamente através da também norma de produto EN 13108-20 -Misturas Betuminosas - Especificações dos Materiais: Ensaios de Tipo,(I. P. d. Q. IPQ, 2008), os ensaios para validar as misturas betuminosas devem cumprir com um dos três modelos seguintes:

- a) todas as propriedades demonstradas através da validação em laboratório;
- b) todas as propriedades demonstradas através da validação de produção;
- c) algumas propriedades demonstradas através da validação em laboratório e outras demonstradas através da validação de produção.

Esta norma refere ainda que para a mesma propriedade, ensaios realizados em provetes preparados e compactados em laboratório, dão frequentemente resultados diferentes dos resultados de ensaios realizados em provetes obtidos a partir da mistura em central e da compactação in situ, e que esta situação deverá ser considerada nas especificações e deverá existir um cuidado especial na comparação dos resultados com os limites adequados.

Acresce a esta particularidade, a incerteza existente e que deveria ser estimada para o ensaio associado a determinada propriedade, que não é contemplada e que não deverá ultrapassar um valor que ponha em causa a categoria a declarar para a mesma.

A partir deste exemplo pode-se verificar como é importante a estimativa de uma incerteza. Se por um lado existe a dificuldade de comparar misturas produzidas em laboratório e in-situ, obrigatoriamente estamos perante cenários que conduzirão a estimativas de incerteza muito distintas e que necessariamente deveremos comparar e quantificar, para verificação da sua grandeza e de que modo conduzirá a alterações significativas na categoria da característica.

Este trabalho visa esse contributo. O ponto 5 “Análise de resultados e estimativa da incerteza” deste trabalho contém indicações para este fim, conseguidas a partir de um ensaio de comparação interlaboratorial organizado especificamente para o efeito da presente tese, e apresentado no capítulo a seguir. No ponto 6 “Considerações finais” são tecidas conclusões, propostas e recomendações para o futuro

4. Estudo do ensaio de comparação interlaboratorial – Ensaio de pista: Wheel-Tracking

Os ensaios de comparação interlaboratorial (ECI) são uma ferramenta de extrema importância para que os laboratórios possam:

- Avaliar o seu desempenho;
- Demonstrar a sua competência técnica perante terceiros;
- Estabelecer confiança recíproca entre Laboratórios idênticos;
- Excluir erros sistemáticos, não detetáveis por outros métodos;
- Validar métodos;
- Implementar ações corretivas e preventivas após análise dos resultados obtidos;
- Obter reconhecimento mútuo de resultados de ensaio, tanto a nível nacional como internacional.

A RELACRE promove ECI's ou Ensaio de Aptidão, de acordo com metodologias internacionalmente aceites no seio da ISO e da ILAC com o objetivo de apoiar os laboratórios, de Ensaio e de Calibração.

Para concretização deste trabalho foi possível participar na organização e implementação, colaborando com a RELACRE, de um ensaio nacional de comparação interlaboratorial (ECI) para o ensaio de pista: Wheel-Tracking. A seguir encontram-se descritas todas as suas fase / características.

4.1. Características da Mistura Betuminosa para realização do ECI

A mistura betuminosa utilizada para a realização do ECI foi uma Mistura Betuminosa Densa, AC14Reg/Bin 35/50 (BBsb), de acordo com a NP EN 13108-1 -*Misturas betuminosas-Especificações dos materiais- Parte 1: Betão betuminoso* (I. P. d. Q. IPQ, 2011). Foi formulada pelo anexo nacional desta norma, com validação em laboratório, a partir de agregados de origem granítica e um betume convencional 35/50.

Foi produzida numa central de produção Intrame, tipo descontínua Modelo: RM 160 de 160 Ton/h e estava a ser aplicada na obra “A3 – Auto-Estrada Porto/Valença (Sublanço Maia / Santo Tirso), cujo dono de obra é a Brisa Engenharia.

Desta forma, todos os parâmetros para os materiais constituintes, mistura betuminosa produzida e aplicada cumpriram os valores do caderno de encargos deste dono de obra,

No Quadro 4.1 apresentam-se resumidamente as características volumétricas e de estabilidade da mistura betuminosa.

Propriedade avaliada	Percentagem de ligante	
	5,0	5,2
Baridade máxima teórica (kg/m ³)	2500	2500
Baridade dos provetes (kg/m ³)	2420	2425
Porosidade (%)	3,2	3,2
V.M.A. (%)	14,0	14,0
Grau de saturação em betume (%)	78,7	79,4

Quadro 4.1 – Resumo das características volumétricas e de estabilidade da mistura

4.2. Trecho experimental da mistura betuminosa para obtenção dos provetes de ensaio

Os provetes de ensaio foram obtidos da mistura que foi aplicada em trecho experimental, trabalho este realizado pelo laboratório “pivot” - Laboratório Central da Gabriel Couto (LCGC).

O trecho experimental foi realizado, numa extensão de 600 m, aproximadamente, em cima de uma camada de regularização, AC 20 Reg 35/50 MBD, devidamente varrida e regada com uma emulsão de colagem. Numa extensão de cerca de 100 m de comprimento, foi aplicada uma camada de areia para que a extração dos provetes fosse efetuada adequadamente sem danificar os mesmos.

A metodologia de compactação consistiu na utilização de 1 cilindro de pneus que efetuou 6 passagens, seguidas de 3 passagens de um cilindro de rolos.

Na Figura 4.1 pode-se observar a aplicação da mistura betuminosa no trecho experimental, conforme descrição anterior.



Figura 4.1 – Trecho experimental

4.3. Provetes para ensaios em laboratório

Após 6 dias da realização do trecho experimental foram retirados, de forma sequencial, os provetes para ensaio, 2 provetes por laboratório inscrito, cumprindo a norma EN 12697-27, Figura 4.2

Os provetes retirados do pavimento para ensaio foram transportados até ao LCGC a uma temperatura inferior a 25°C. Foram armazenados no laboratório garantindo que a temperatura da superfície a ensaiar não ultrapassasse os 25°C e que os provetes permanecessem em posição horizontal.



Figura 4.2 – Preparação para recolha dos provetes

Os provetes foram levantados pelos laboratórios participantes para serem submetidos aos ensaios executados. Na Figura 4.3 apresentam-se fotografias dos provetes a serem preparados para ensaio. Foram cortados de forma a ser possível colocar os provetes nos moldes para realização do ensaio.

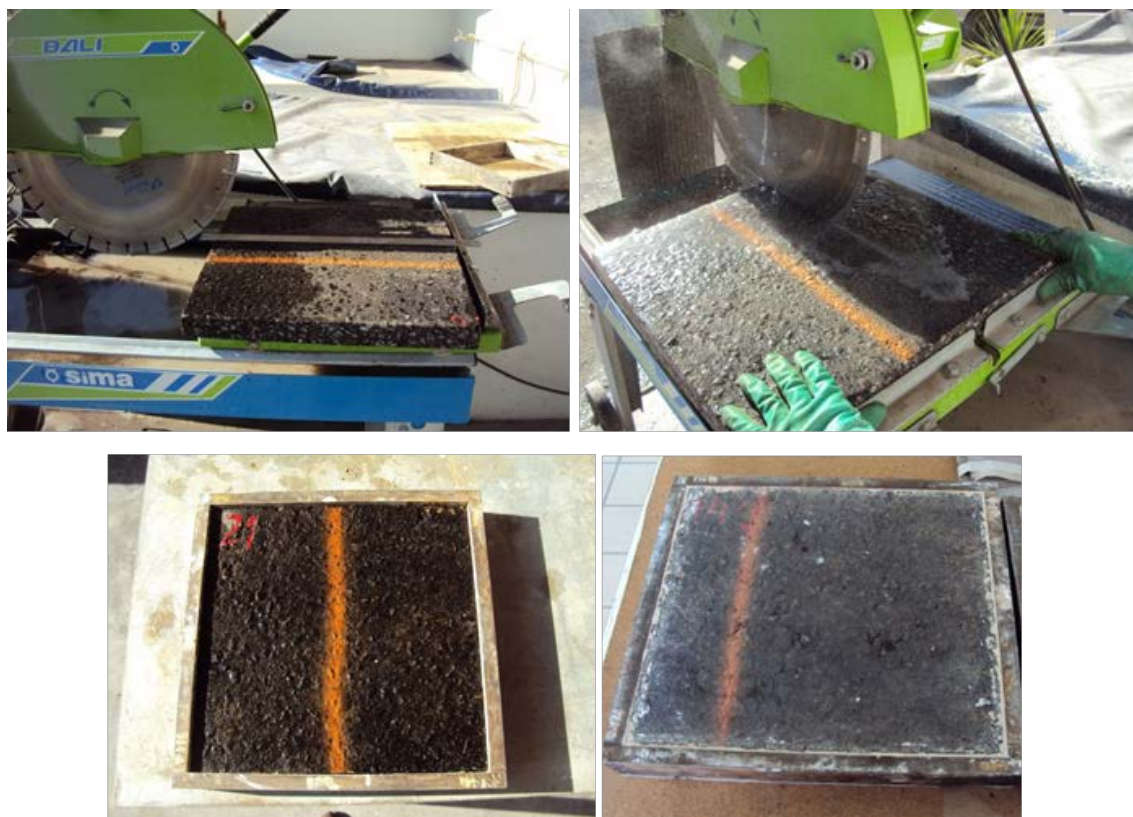


Figura 4.3 – Preparação dos provetes

4.4. Realização dos ensaios

Os ensaios foram executados pelo mesmo operador em cada laboratório.

Antes da realização do ensaio de pista, os laboratórios determinaram a baridade dos provetes (conforme previsto na EN 12697-22), segundo a EN 12697-6: 2003+A1:2007 (Método B).

Após esta determinação, os provetes foram sujeitos ao ensaio de pista de acordo com a EN 12697-22:2003+A1:2007 (Equipamento de pequenas dimensões; Método B, ao ar).

5. Análise de resultados e estimativa da incerteza

5.1. Síntese dos resultados apresentados pelos laboratórios

A seguir apresenta-se uma síntese dos resultados obtidos relativamente a:

- 1 - Análise estatística efetuada decorrente do ECI promovido pela relacre.
- 2 - Análise estatística efetuada através da aplicação SPSS.

1 - Análise estatística efetuada no âmbito do ECI promovido pela RELACRE

Para cada variável escolhida para análise, foram apresentadas as respetivas análises estatísticas usualmente utilizadas em comparações interlaboratoriais e com base na metodologia estabelecida pelas normas ISO 2602 (1980) e ISO 5725 (1994). A avaliação do desempenho dos laboratórios foi baseada no índice de desempenho conforme indicado na norma ISO/IEC 17043:2010.

A seguir é apresentada a metodologia utilizada e presente no relatório da RELACRE para o tratamento estatístico dos dados fornecidos pelos laboratórios participantes:

Cálculos da Média e de Valores de precisão:

- Média amostral para cada parâmetro, por laboratório i:

$$Y_i = \frac{(y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in})}{n}$$

Em que n representa o n.º de provetes ensaiados pelo laboratório i.

- Média de médias para cada parâmetro:

$$Y = \frac{1}{p} \sum_i^p Y_i$$

Em que p representa o número de laboratórios.

Após a eliminação de “aberrantes”, este valor é considerado como o verdadeiro valor amostral.

- Desvio padrão das médias obtidas pelos diferentes laboratórios:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^p (Y_i - Y)^2}{p - 1}}$$

- Variância da repetibilidade (s_r^2) para um dado ensaio:

$$s_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^p (n_i - 1) s_i^2}{\sum_{i=1}^p (n_i - 1)} \quad \text{com} \quad s_i^2 = \frac{\sum_{k=1}^{n_i} (y_{ik} - Y_i)^2}{(n_{ik} - 1)}$$

- Variância interlaboratorial para um dado ensaio:

$$s_L^2 = \frac{s_d^2 - s_r^2}{n} \quad \text{com} \quad s_d^2 = \frac{1}{p-1} \sum_{i=1}^p n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad \text{e} \quad \bar{n} = \frac{1}{p-1} \left[\sum_{i=1}^p n_i - \frac{\sum_{i=1}^p n_i^2}{\sum_{i=1}^p n_i} \right]$$

- Variância da reprodutibilidade para um dado ensaio:

$$s_R^2 = s_L^2 + s_r^2$$

- Coeficiente de variação da repetibilidade (CV_r):

$$CV_r = \frac{S_r}{Y}$$

- Coeficiente de variação da reprodutibilidade (CV_R):

$$CV_R = \frac{S_R}{Y}$$

- Limite de repetibilidade (r):

$$r = 2,83 * s_r$$

- Limite de reprodutibilidade (R):

$$R = 2,83 * s_R$$

Avaliação de desempenho:

- Cálculo do Indicador de desempenho – Z-Score:

$$Z_i = \frac{Y_i - Y}{s}$$

Em que:

Y_i = média individual do laboratório (média amostral para cada parâmetro)

Y = média global dos laboratórios (após eliminação dos valores aberrantes)

s = desvio padrão (após eliminação dos valores aberrantes)

Nota1: O valor numérico do fator Z é indicador do desempenho do laboratório para cada parâmetro ensaiado:

$$|Z| \geq 3 \text{ - Inaceitável}$$

$$2 < |Z| < 3 \text{ - Questionável}$$

$$|Z| \leq 2 \text{ - Aceitável}$$

Foram utilizados os testes estatísticos de Cochran e Grubs para inicialmente serem identificados os valores aberrantes.

O Teste de Cochran permite a eliminação de valores aberrantes com base na variabilidade intralaboratorial, enquanto o teste de Grubbs permite a eliminação de valores aberrantes com base na variabilidade interlaboratorial. A seguir, no Quadro 5.1, apresentam-se os resultados para análise estatística do Ensaio de Comparação Interlaboratorial (ECI) e presente no respectivo Relatório da RELACRE e seguidamente na Figura 5.1, Figura 5.2, Figura 5.3 são apresentados os gráficos para os parâmetros calculados pelos diferentes laboratórios.

	RDair - Profundidade de rodeira após 10 000 ciclos (mm)				WTS air - Taxa de deformação (mm/10 ³ ciclos)				Baridade (kg/m ³)					
Laboratórios	yi ₁	yi ₂	yi	Valor Z-score	yi ₁	yi ₂	yi	Valor Z-score	yi ₁	yi ₂	yi	Valor Z-score		
L1	5,93	6,91	6,42	0,0	0,23	0,28	0,26	-0,10	2359	2352	2356	-0,9		
L2	10,39	10,04	10,22	0,7	0,42	0,26	0,34	0,20	2360	2353	2357	-0,8		
L3	4,86	3,96	4,41	-0,5	0,25	0,15	0,20	-0,30	2356	2351	2354	-1,2		
L4	14,92	16,72	15,82	1,9	0,80	0,82	0,81	2,20	2362	2363	2363	0,0		
L5	2,87	3,41	3,14	-0,7	0,12	0,13	0,13	-0,60	2372	2368	2370	1,0		
L6	3,20	4,10	3,65	-0,6	0,09	0,18	0,14	-0,60	2371	2377	2374	1,5		
L7	3,02	2,67	2,85	-0,8	0,11	0,10	0,11	-0,70	2362	2369	2366	0,4		
média das médias:			Y	6,64	média das médias:			Y	0,28	média das médias:			Y	2363
desvio padrão:			s	4,7900	desvio padrão:			s	0,2457	desvio padrão:			s	7,8
variância de repetibilidade			sr ²	0,45	variância de repetibilidade			sr ²	0,00	variância de repetibilidade			sr ²	16,07
variância intralaboratorial			sd ²	45,89	variância intralaboratorial			sd ²	0,12	variância intralaboratorial			sd ²	121,17
variância interlaboratorial			sL ²	22,72	variância interlaboratorial			sL ²	0,06	variância interlaboratorial			sL ²	52,55
variância de reprodutibilidade			sR ²	23,17	variância de reprodutibilidade			sR ²	0,06	variância de reprodutibilidade			sR ²	68,62
coeficiente de variação de repetibilidade			CVr	10,1%	coeficiente de variação de repetibilidade			CVr	20,6%	coeficiente de variação de repetibilidade			CVr	0,2%
coeficiente de variação de reprodutibilidade			CVR	72,5%	coeficiente de variação de reprodutibilidade			CVR	89,0%	coeficiente de variação de reprodutibilidade			CVR	0,4%
repetibilidade			r	1,91	repetibilidade			r	0,16	repetibilidade			r	11,35
reprodutibilidade			R	13,62	reprodutibilidade			R	0,7	reprodutibilidade			R	23,44

Quadro 5.1 – Análise estatística do ECI

Resultados da Profundidade de rodeira após 10 000 ciclos de todos os provetes por laboratório

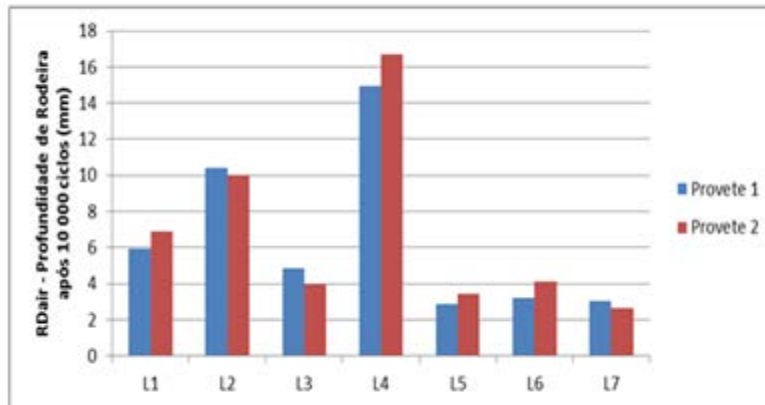


Figura 5.1 – Análise gráfica – Rdair Profundidade de rodeira após 10 000ciclos

Resultados da Taxa de Deformação de todos os provetes por laboratório

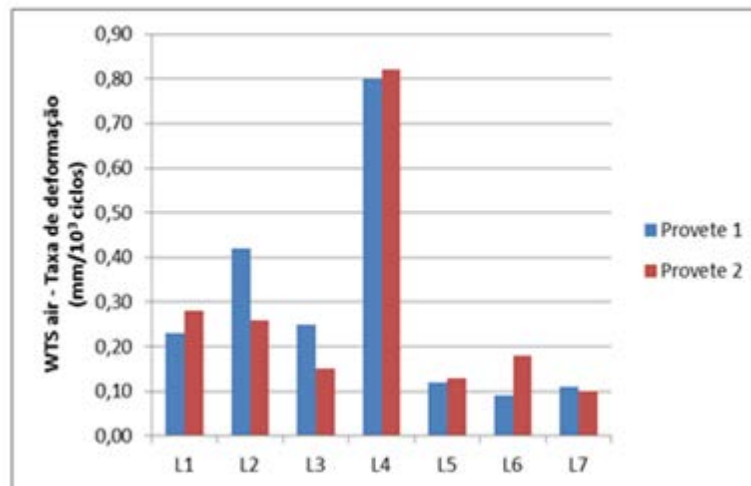


Figura 5.2 – Análise gráfica – WTSair Taxa de deformação

Resultados da Baridade de todos os provetes por laboratório

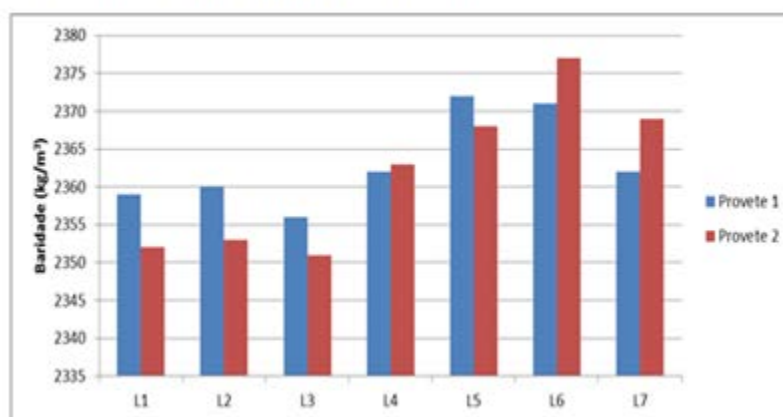


Figura 5.3 – Análise gráfica – Baridade

Pode-se verificar uma grande variabilidade nos resultados obtidos pelos diferentes laboratórios.

Com esta análise efetuada, os laboratórios participantes têm oportunidade de analisar os seus resultados dos ensaios e o respetivo tratamento estatístico, o que lhes possibilitará ter ferramentas para poderem avaliar o seu desempenho no que diz respeito à técnica do ensaio, possibilidade de definição de indicadores de desempenho, implementação de ações de melhoria/corretivas para o caso de desvios significativos face ao expectável para os resultados do ensaio, etc.

É importante salientar que para qualquer laboratório é sempre uma mais valia participar ensaios de comparação interlaboratorial, principalmente quando participam em ECIs promovidos por entidades organizadoras como a RELACRE, tendo, desta forma, a hipótese de comparar os seus valores, e consequentemente as suas técnicas, com laboratórios que também têm os mesmos objetivos de boas práticas e obtenção de resultados fidedignos. Assim, podem ter sempre um feedback do seu desempenho e até mesmo obter alertas para algumas questões podendo evoluir e caminhar sempre no sentido da melhoria continua.

2 - Análise realizada através do SPSS

Foi realizada uma análise exploratória de todos os resultados obtidos (Resultados do ECI promovido pela RELACRE mais resultados extras obtidos pelo laboratório piloto da mesma mistura produzida para o ECI).

Esta análise foi efetuada com utilização do SPSS. O SPSS é o “software” de manipulação, análise e apresentação de resultados de análise de dados. Apesar do SPSS ter sido concebido, no início da década de 80 do Sec. XX, para um público-alvo das ciências sociais, atualmente é utilizado em todas as áreas do conhecimento: das ciências exatas às ciências da engenharia e econometria, rivalizando com outros excelentes programas de análise estatística que, tradicionalmente, dominavam estas áreas, (Maroco, 2010).

Assim com o apoio dos livros “Análise Estatística com utilização do SPSS”, (Maroco, 2010), “Análise de dados para ciências Sociais – A complementaridade do SPSS”, (Pestana & Gageiro, 2005) e “Introdução à análise de dados com recurso ao SPSS”, (Ramos Pinto, 2009), foi possível fazer uma análise exploratória dos resultados obtidos do ensaio de pista (Wheel-Tracking).

Análise exploratória

Foi efetuada a análise exploratória para os parâmetros da baridade e profundidade de rodeira. Para esta análise foram considerados todos os resultados dos ensaios realizados a uma mesma mistura betuminosa (conforme ponto 3 do capítulo 4 deste trabalho), os ECIS e mais 3 ensaios extra realizados pelo laboratório pivot (laboratório que responsável pela preparação das amostras).

Apesar de o ensaio de pista pelo método B ao ar considerar como resultado final, a média dos dois provetes, para esta análise foram observados todos os resultados individuais com o intuito de se apurar a existência, ou não, de variações significativas entre laboratórios.

A seguir apresenta-se a análise, através de gráfico de barras (para cada parâmetro: baridade dos provetes e profundidade de rodeira), com todos os resultados (de todos os laboratórios) obtidos decorrentes da realização do ensaio de pista (Wheel-Tracking).

Para os resultados da baridade, através da análise do gráfico de barras da Figura 5.4, verifica-se que os laboratórios L6 e L7 (com o L4 a seguir mais próximo) obtiveram um maior valor relativamente aos restantes laboratórios.

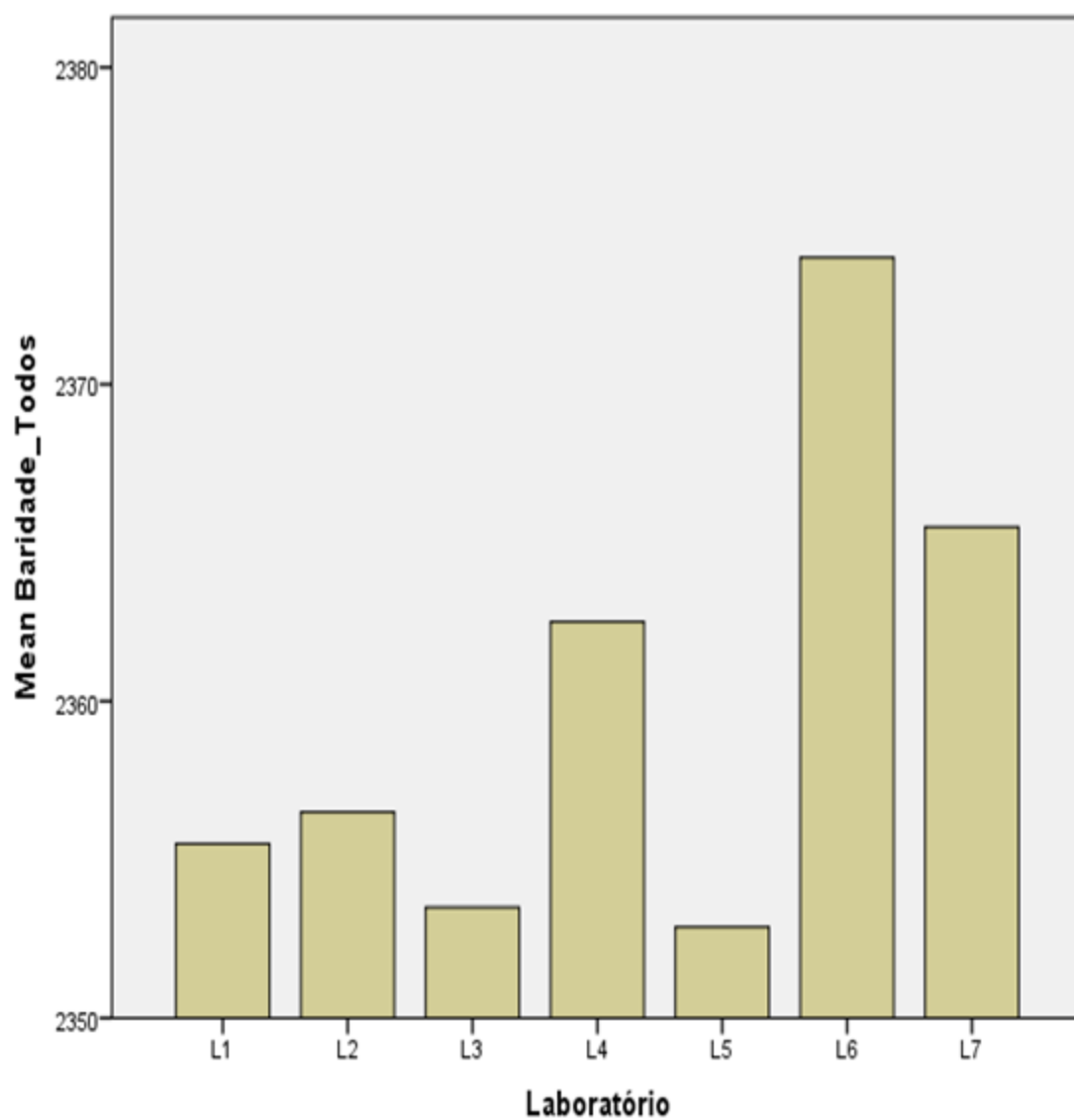


Figura 5.4 – Resultados da Baridade (kg/m³) de todos os provetes por laboratório

Quanto à profundidade de rodeira pode-se observar que o L4 obteve um resultado superior ao dos restantes laboratórios, verificando-se que não é inversamente proporcional relativamente à baridade (como seria de esperar). Pela análise da Figura 5.5 conclui-se assim que os resultados do L4 são de facto de estranhar, pela diferença dos valores que o mesmo apresenta relativamente aos resultados obtidos pelos restantes laboratórios. Por este motivo decidiu-se não entrar com os valores do L4 para a análise que se apresenta seguidamente.

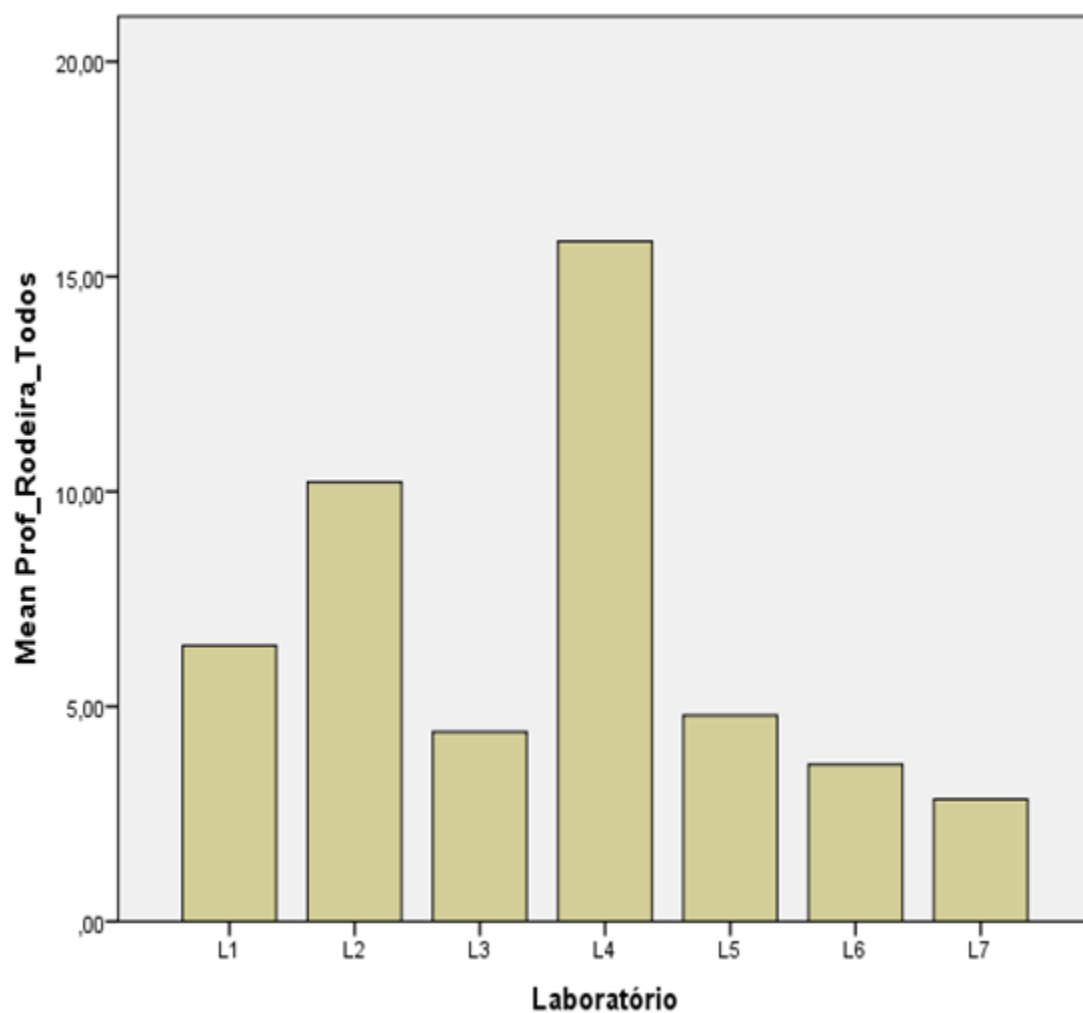


Figura 5.5 – Resultados da profundidade de rodeira (mm) de todos os provetes por laboratório

De forma a se observar a dispersão dos valores dos resultados por laboratório (com exceção do L4), apresenta-se a seguir os gráficos de bigodes, Figura 5.6 e Figura 5.7.

Pode-se verificar que o laboratório L5 tem a dispersão maior de resultados do que os restantes laboratórios. Apesar deste tipo de gráfico não nos dar a informação do tamanho da amostra de cada laboratório, importante é dizer que o L5 tem uma amostra de 8 ensaios e os restantes laboratórios têm uma amostra de 2 ensaios cada um. De referir que as amostras foram retiradas de um pavimento (“in-situ”) e que existem variáveis que podem estar associadas à aplicação da mistura betuminosa.

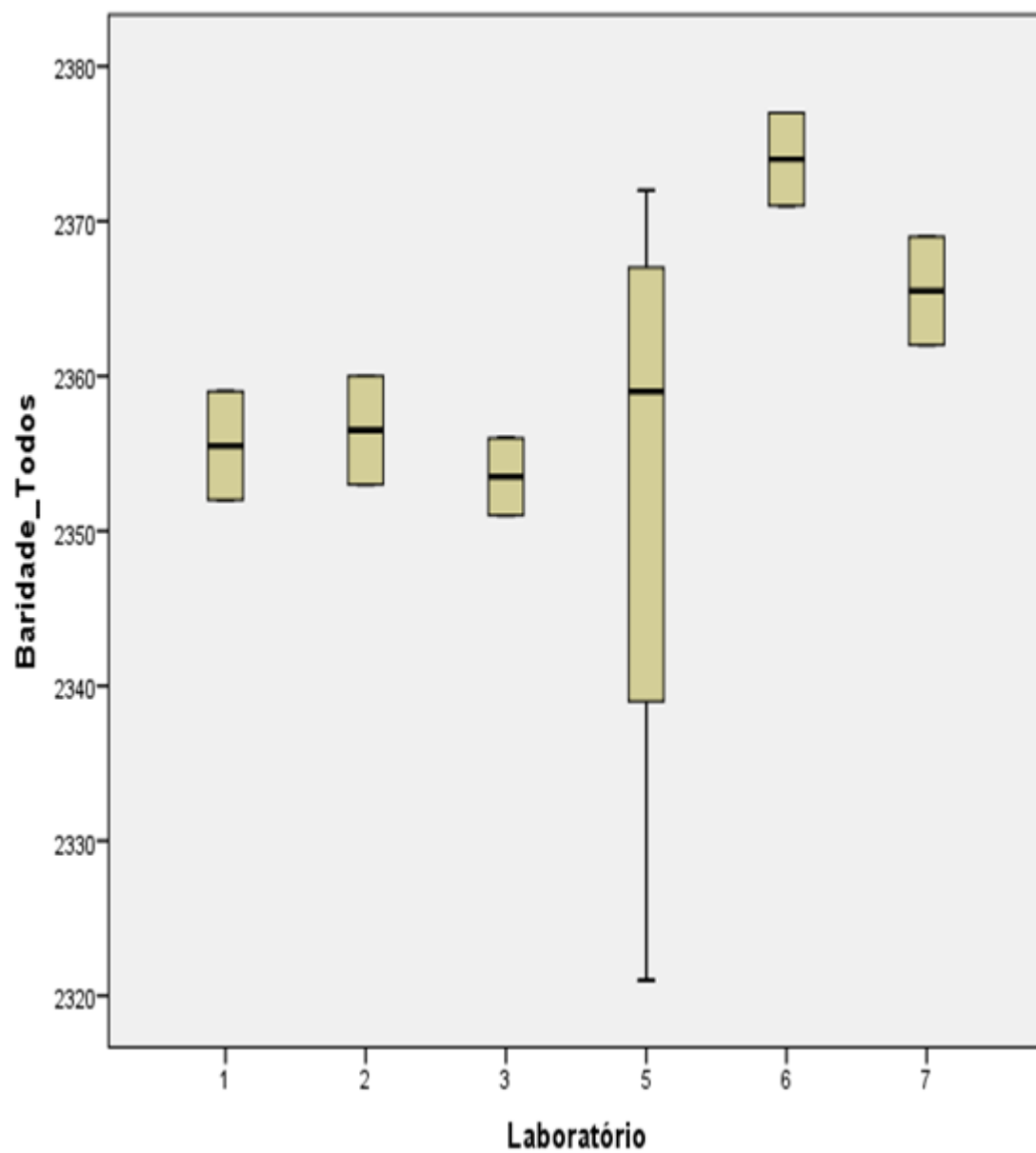


Figura 5.6 – Gráfico de bigodes - Resultados da Baridade (kg/m³) de todos os provetes por laboratório

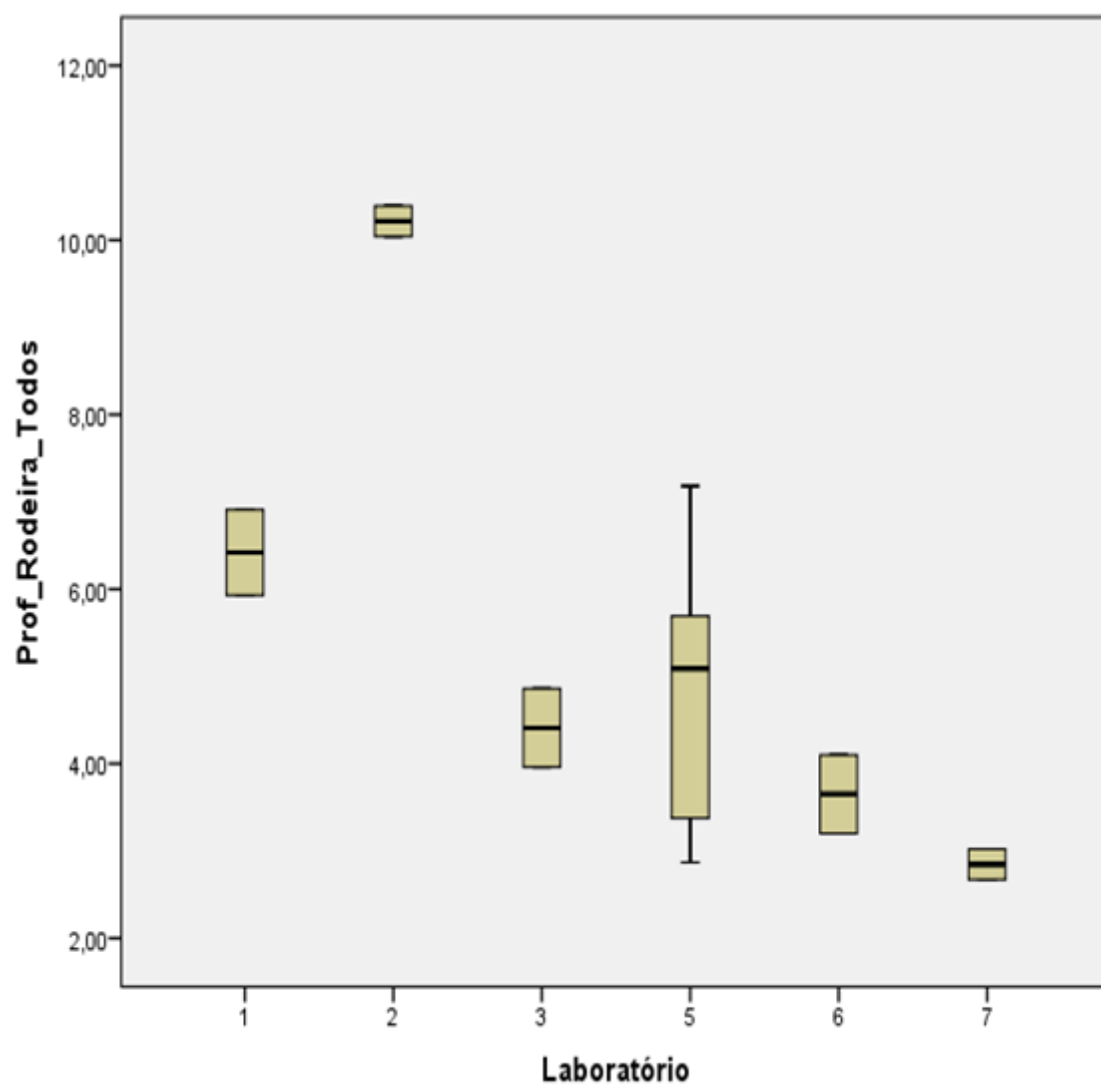


Figura 5.7 – Gráfico de bigodes - Resultados da profundidade de rodeira (mm) de todos os provetes por laboratório

Teste da normalidade

Para testar a normalidade dos resultados, o teste mais utilizado (teste paramétrico) é o teste de Kolmogorov-Smirnov embora, devido ao tamanho da amostra (por laboratório) ser inferior a 10, este teste não é o indicado. No entanto, na inexistência de condições para utilização destes testes paramétricos, devem então ser aplicados como alternativa os testes não paramétricos.

O teste Kruskal-Wallis é um teste não paramétrico que pode ser utilizado para testar se duas ou mais amostras provêm de uma mesma população.

No Quadro 5.2 e Quadro 5.4 (para a baridade e profundidade de rodeira respetivamente) representam as dimensões de cada grupo e a ordem média de cada grupo.

No Quadro 5.3 e Quadro 5.5 (para a baridade e profundidade de rodeira respetivamente) representam o valor da estatística de teste ("Chi-square"), os graus de liberdade ("df") e a probabilidade de significância calculada assintoticamente ("Asymp. Sig").

Ranks			
	Laboratório	N	Mean Rank
Baridade_Todos	1	2	7,00
	2	2	8,00
	3	2	5,75
	5	8	8,63
	6	2	17,00
	7	2	13,25
	Total	18	

Quadro 5.2 – Teste Kruskal-Wallis, Ranks - Baridade

Test Statistics^{a,b}

	Baridade_Todos
Chi-Square	6,746
df	5
Asymp. Sig.	,240

a. Kruskal Wallis Test

b. Grouping Variable:
Laboratório

Quadro 5.3 – Teste Kruskal-Wallis, Test Statistics - Baridade

Ranks

	Laboratório	N	Mean Rank
Prof_Rodeira_Todos	1	2	14,50
	2	2	17,50
	3	2	8,50
	5	8	9,25
	6	2	6,00
	7	2	2,00
	Total	18	

Quadro 5.4 – Teste Kruskal-Wallis, Ranks – Profundidade de Rodeira

Test Statistics ^{a,b}	
	Prof_Rodeira _Todos
Chi-Square	11,140
df	5
Asymp. Sig.	,049

a. Kruskal Wallis Test

b. Grouping Variable:
Laboratório

Quadro 5.5 – Teste Kruskal-Wallis, Test Statistics – Profundidade de Rodeira

Analisando estes resultados, verifica-se que não há diferenças entre grupos de laboratório nos valores apresentados para a baridade ($p=0,240 > \alpha=0,05$).

Já para a profundidade de rodeira consta-se a existência de diferenças significativas ($p=0.049 < \alpha=0,05$), permitindo assim concluir que este ensaio tem condições/restrições de realização que devem ser garantidas, e caso contrário, podem influenciar o resultado final.

Comparações Múltiplas utilizando o Teste LSD – Comparação Múltipla de médias das ordens a partir de amostras independentes

Da análise anterior, utilizando o teste de Kruskal-Wallis, conclui-se que para os resultados obtidos para a profundidade de rodeira existem diferenças significativas. O teste de Kruskal-Wallis não nos permite porém saber quais os laboratórios que diferem significativamente.

Para identificar quais os laboratórios com resultados para a profundidade de rodeira que são significativamente diferentes, foi necessário proceder à comparação múltipla das médias das ordens.

No Quadro 5.6 a comparação múltipla das médias das ordens recorrendo ao teste LSD de Fisher dado pelo SPSS.

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Rank of Prof_Rodeira_Todos
LSD

(I) Laboratório	(J) Laboratório	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	-3,000000	3,730505	,437	-11,12807	5,12807
	3	6,000000	3,730505	,134	-2,12807	14,12807
	5	5,250000	2,949223	,100	-1,17581	11,67581
	6	8,500000*	3,730505	,042	,37193	16,62807
	7	12,500000*	3,730505	,006	4,37193	20,62807
2	1	3,000000	3,730505	,437	-5,12807	11,12807
	3	9,000000*	3,730505	,033	,87193	17,12807
	5	8,250000*	2,949223	,016	1,82419	14,67581
	6	11,500000*	3,730505	,009	3,37193	19,62807
	7	15,500000*	3,730505	,001	7,37193	23,62807
3	1	-6,000000	3,730505	,134	-14,12807	2,12807
	2	-9,000000*	3,730505	,033	-17,12807	-,87193
	5	-,750000	2,949223	,804	-7,17581	5,67581
	6	2,500000	3,730505	,515	-5,62807	10,62807
	7	6,500000	3,730505	,107	-1,62807	14,62807
5	1	-5,250000	2,949223	,100	-11,67581	1,17581
	2	-8,250000*	2,949223	,016	-14,67581	-1,82419
	3	,750000	2,949223	,804	-5,67581	7,17581
	6	3,250000	2,949223	,292	-3,17581	9,67581
	7	7,250000*	2,949223	,030	,82419	13,67581
6	1	-8,500000	3,730505	,042	-16,62807	-,37193
	2	-11,500000*	3,730505	,009	-19,62807	-3,37193
	3	-2,500000	3,730505	,515	-10,62807	5,62807
	5	-3,250000	2,949223	,292	-9,67581	3,17581
	7	4,000000	3,730505	,305	-4,12807	12,12807
7	1	-12,500000*	3,730505	,006	-20,62807	-4,37193
	2	-15,500000*	3,730505	,001	-23,62807	-7,37193
	3	-6,500000	3,730505	,107	-14,62807	1,62807
	5	-7,250000*	2,949223	,030	-13,67581	-,82419
	6	-4,000000	3,730505	,305	-12,12807	4,12807

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

Quadro 5.6 – Teste LSD de Fisher – Comparação múltipla

Analisando o output das comparações múltiplas apresentado no Quadro 5.6 é possível concluir que, para $\alpha=0,05$, as diferenças estatisticamente significativas no parâmetro profundidade de rodeira existem entre os seguintes laboratórios:

- Entre L1 e L6
- Entre L1 e L7
- Entre L2 e L3
- Entre L2 e L5
- Entre L2 e L6
- Entre L2 e L7
- Entre L5 e L7

No entanto, também podemos verificar que não há diferenças significativas nos resultados entre os seguintes laboratórios:

- Entre o L1 e L2
- Entre o L1 e L3
- Entre o L1 e L5
- Entre o L3 e L5
- Entre o L3 e L6
- Entre o L3 e L7
- Entre o L5 e L6

5.2. Análise do desempenho dos laboratórios

Análise baseada no cálculo do indicador de desempenho – Z-Score

Foi realizada uma análise do desempenho dos laboratórios através do cálculo do Indicador de desempenho – Z-Score, conforme já explicado no ponto 5 do capítulo 4 “Estudo do Ensaio de comparação interlaboratorial – Ensaio de pista: Wheel-Tracking.

A seguir poderemos ver o indicador de desempenho – Zscore calculado para todos os resultados obtidos incluindo os resultados obtidos nos 3 ensaios extra que o laboratório pivot (L5) realizou e com exceção do L4, visto que, como já concluímos anteriormente, apresenta valores duvidosos.

Assim, analisando o Quadro 5.7 e a Figura 5.8, existem dois resultados considerados questionáveis (que se encontram a amarelo) de valor igual 2.2, e os restantes podemos concluir que são aceitáveis.

Laboratórios	Baridade (kg/m³)		Valor Z-score	RDair		Valor Z-score	WTS _{air}		Valor Z-score
				Profundidade de rodeira após 10 000 ciclos (mm)			Taxa de deformação (mm/10³ ciclos)		
	1ª Medição	2ª Medição		1ª Medição	2ª Medição		1ª Medição	2ª Medição	
L1	2359	2352	-0,1	5,93	6,91	0,5	0,23	0,28	0,8
L2	2360	2353	-0,1	10,39	10,04	2,2	0,42	0,26	1,8
L3	2356	2351	-0,3	4,86	3,96	-0,3	0,25	0,15	0,0
L5	2372	2368	0,9	2,87	3,41	-0,9	0,12	0,13	-0,9
L6	2371	2377	1,2	3,20	4,10	-0,7	0,09	0,18	-0,8
L7	2362	2369	0,6	3,02	2,67	-1,0	0,11	0,10	-1,2
L5a	2366	2362	0,5	4,68	3,34	-0,5	0,17	0,13	-0,6
L5b	2332	2321	-2,2	7,18	5,50	0,5	0,31	0,23	0,9
L5c	2356	2346	-0,5	5,55	5,83	0,2	0,23	0,23	0,4

Quadro 5.7 – Avaliação do Desempenho – Z-Score

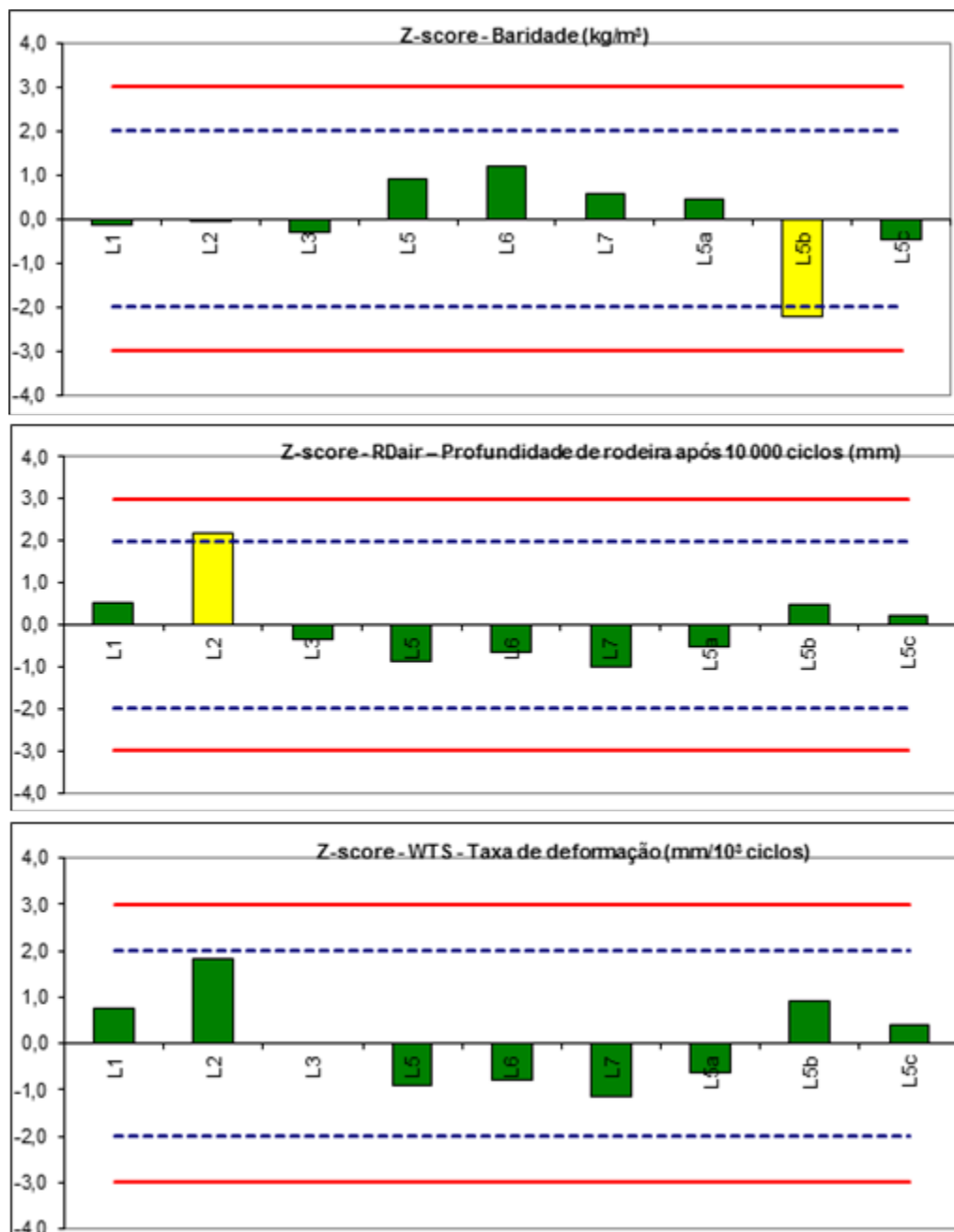


Figura 5.8 – Análise Gráfica do Z-Score

Análise baseada em documentos de referência

Como já referido no ponto 3.3 deste trabalho, a norma EN 13108-1(I. P. d. Q. IPQ, 2011) especifica os requisitos das misturas do grupo betão betuminoso destinado a estradas, aeroportos e outras áreas de circulação, não especificando no entanto critérios de aceitação para cada tipo de mistura betuminosa. Complementando a EN 13108-1(I. P. d. Q. IPQ, 2011), tem-se a EN 13108-20(I. P. d. Q. IPQ, 2008) que especifica o procedimento dos Ensaio Tipo a realizar para validação das misturas betuminosas destinadas a estradas, aeroportos e outras áreas de circulação.

Assim, conforme os resultados obtidos para os ensaios tipo, o produtor especifica o seu produto de acordo com as categorias presentes na EN 13108-1(I. P. d. Q. IPQ, 2011).

Apesar de não existir nenhuma especificação/norma com critérios de aceitação definidos para os valores da Taxa de Deformação WTS_{air} de uma mistura betuminosa, podemos no entanto com apoio na norma EN 13108-1(I. P. d. Q. IPQ, 2011) e de um caderno de encargos, (Brisa, 2013), fazer uma pré avaliação acerca dos resultados obtidos decorrentes deste trabalho.

Conforme se pode verificar na Figura 5.9, segundo o caderno de encargos onde se encontram os critérios de aceitação para as misturas betuminosas a aplicar na empreitada em questão, no caso da mistura AC14 reg 35/50 (BBsb), o valor de referência para a taxa de deformação permanente é de 0,19 mm/103 ciclos.

Porém, na norma do produto, EN 13108-1(I. P. d. Q. IPQ, 2011), conforme identificado na Figura 5.11 e onde se encontram as características e requisitos para as misturas betuminosas, apenas se refere que se deve declarar a categoria da taxa de deformação permanente WTS_{air} . Para se seleccionar essa categoria, terá que se fazer o ensaio tipo e face ao resultado obtido consulta-se a norma EN 13108-1(I. P. d. Q. IPQ, 2011) (das três opções, na Figura 5.10 apresenta-se uma dessas opções) e opta-se por uma categoria a declarar, o que significa ter a garantia de que esse produto não ultrapassará determinado valor para o parâmetro em questão.

Supostamente, o valor 19 mm/103 ciclos apresentado no CE (Brisa, 2013) enquadra-se na categoria WTSAIR0.30 o que significa que o valor do WTSAIR não poderia ser superior a 0,30 mm/103 ciclos, o que não limita mesmo assim o valor mínimo admissível.

Parâmetro a controlar		Referência Normativa	Critérios de Aceitação do CE/CTE			
			MICROBETÃO BETUMINOSO PARA REGULARIZAÇÃO AC 10 reg PMB 45/80-65 (mBBR)	BETÃO BETUMINOSO SUBJACENTE À CAMADA DE DESGASTE AC 14 reg 35/50 (BBsub)	BETÃO BETUMINOSO DE DESGASTE AC 14 surf 35/50 (BBD)	BETÃO BETUMINOSO DRENANTE PA 12,5 PMB 45/80-65 (BBd)
MISTURA BETUMINOSA						
Caract. Marshall	Número de pancadas em cada extremo do provete	EN 12697-30	75	75	75	NA
	Força de rotura	EN 12697-34	8 - 20 kN	8 - 21 kN	8 - 21 kN	NA
	Deformação		2 - 4 mm	2,5 - 4 mm	2,5 - 4 mm	NA
	Quociente Marshall		Qmin2,5	Qmin2,5	Qmin2,5	NA
Índice de resistência Conservada (IRC) em ensaios de compressão Marshall		MIL-STD-620A	≥ 80%	≥ 80%	≥ 80%	≥ 80%
% de ligante mínima ¹¹		EN 12697-1 EN 12697-39	≥ 5,3%	≥ 5,0%	≥ 5,0%	≥ 4,0%
Vazios na Mistura de Agregados (VMA) ¹²		EN 12697-8	≥ 14%	≥ 14%	≥ 14%	Declarar valor
Porosidade (V _p) ¹³		EN 12697-8	3 - 5%	3 - 5%	3 - 5%	22 - 30%
Relação Ponderal de filler/Betume		-	1,3 a 1,5%	1,2 a 1,5%	1,3 a 1,5%	Declarar valor
Resist. a Deformação	Taxa de Deformação WTS ₁₀ (mm/10 ³ s)	EN 12697-22 (equip. pequeno -	-	0,19	0,15	--
Permanente (Wheel-tracking) ¹⁴	Profundidade de rodeira máxima PRD ₁₀ - %	Proc. B, acondicionamento ao ar, temp de ensaio 60°C	-	Declarar valor	Declarar valor	--

Figura 5.9 – Critérios de Aceitação do CE/CTE – Brisa

Taxa de deformação em ensaio de pista, mm por 10 ³ ciclos de carga	Categoria WTS_{AIR}
0,03	$WTS_{AIR\ 50,03}$
0,05	$WTS_{AIR\ 0,05}$
0,07	$WTS_{AIR\ 0,07}$
0,10	$WTS_{AIR\ 0,1}$
0,15	$WTS_{AIR\ 0,15}$
0,30	$WTS_{AIR\ 0,30}$
0,40	$WTS_{AIR\ 0,40}$
0,50	$WTS_{AIR\ 0,50}$
0,60	$WTS_{AIR\ 0,60}$
0,80	$WTS_{AIR\ 0,80}$
1,00	$WTS_{AIR\ 1,00}$
Não requerido	$WTS_{AIR\ NR}$
^{a)} Para cargas por eixo < 13 t.	

Figura 5.10 – Resistência à deformação permanente, equipamento pequeno, procedimento B, acondicionamento ao ar, taxa de deformação em ensaio de pista WTS_{air} (EN 13108-1)

NP EN 13108-1		Características dos materiais constituintes			Requisitos gerais						Requisitos empíricos	
Capítulo da Norma		4.2	4.4	4.5	5.2.1		5.2.2	5.2.4	5.2.6	5.2.10	5.2.1.2 + 5.3.1.2	5.3.1.3
Designação anterior	Designação actual	Ligante	Mistura betuminosa recuperada	Aditivos	Composição, granulometria e percentagem de ligante		Série de peneiros	D (mm)	Porosidade, V _{min} a V _{max} (%) (Compactador Impacto 75 pancadas) ^{a)}	Sensibilidade à água (ITSR) (Compactador Impacto 75 Pancadas) ^{b)}	Resistência à deformação permanente (Wheel Tracking) (60°C, equipamento de pequenas dimensões, Método B, ao ar, compactador de rolos)	Temperatura de fabrico da mistura betuminosa
Macadame Betuminoso 0/37,5	AC 32 base ligante (MB)	Tipo e classe a declarar	A declarar	A declarar	Série Base + Série 2	A categoria deve ser declarada	31,5	NR	NR	Consoante ligante	Ver Quadro 2 deste Anexo	A declarar (ver secção 5.2 deste Anexo)
Macadame Betuminoso 0/25	AC 20 base ligante (MB)						20	3,0-6,0				
	AC 20 base ligante (MB)						20	3,0-6,0				
Mistura Betuminosa Densa	AC 20 reg. ligante (MBD)						20	2,0-5,0				
	AC 20 bin. ligante (MBD)						20	2,0-6,0				
Mistura Betuminosa de Alto Módulo	AC 20 base ligante (MBAM)						16	2,0-5,0				
	AC 16 reg. ligante (MBAM)						14	3,0-5,0				
	AC 16 bin. ligante (MBAM)						14	3,0-5,0				
Betão Betuminoso Subjacente	AC 14 reg. ligante (BBsb)						14	3,0-5,0				
	AC 14 bin. ligante (BBsb)						14	3,0-5,0				
Betão Betuminoso C. Desgaste	AC 14 reg. ligante (BB)						14	3,0-5,0				
	AC 14 surf. ligante (BB)						14	3,0-6,0				
Betão Betuminoso Rugoso	AC14 surf. ligante (BBr)						14	3,0-6,0				

Figura 5.11 – Características e requisitos para as misturas betuminosas (EN 13108-1)

No Quadro 5.8 pode-se verificar que a média das médias dos valores obtidos decorrentes deste estudo, com exceção do resultado do L4, é a 0,20, muito próximo do valor apresentado como valor de referência no CE da Bisa e dentro da categoria $WTS_{AIR0.30}$. Desta forma, pode-se concluir que os valores, para a taxa de deformação resultantes deste ECI são valores francamente aceitáveis e dentro do expetável.

Laboratórios	1ª Medição	2ª Medição	Média
L1	0,23	0,28	0,26
L2	0,42	0,26	0,34
L3	0,25	0,15	0,20
L5	0,12	0,13	0,13
L6	0,09	0,18	0,14
L7	0,11	0,10	0,11
L5a	0,17	0,13	0,15
L5b	0,31	0,23	0,27
L5c	0,23	0,23	0,23
Média das Médias:			0,20

Quadro 5.8 – Média da Médias da Taxa de Deformação WTS_{AIR} (mm/103)

5.3. Cálculo da repetibilidade e reprodutibilidade

Aspetos Gerais

De acordo com o Vocabulário Internacional de Metrologia (I. P. d. Q. IPQ, 2012), apresentam-se os seguintes conceitos:

- **Repetibilidade de medição** – precisão de medição sob um conjunto de condições de repetibilidade,
 - ✓ **Condição de repetibilidade de medição** – condição de medição num conjunto de condições, as quais incluem o mesmo procedimento de medição, os mesmos operadores, o mesmo sistema de medição, as mesmas condições de operação e o mesmo local, assim como medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares durante um curto período de tempo.
- **Reprodutibilidade de medição** – precisão de medição conforme conjunto de condições de reprodutibilidade,
 - ✓ **Condição de reprodutibilidade de medição** – condição de medição num conjunto de condições, as quais incluem diferentes locais, diferentes operadores, diferentes sistemas de medição e medições repetidas no mesmo objeto ou objetos similares.

Decorrente da análise estatística para este trabalho, apresentam-se os dados recolhidos da análise estatística, no Quadro 5.9, Quadro 5.10 e Quadro 5.11 incluindo os valores de fidelidade de medição (repetibilidade r e reprodutibilidade R), para diferentes panoramas e diferentes parâmetros do ensaio de pista (“Wheel Tracking”) que foram calculados conforme a metodologia descrita no ponto 5 do capítulo 4.

- Análise Estatística - ECI promovido pela RELACRE**

Laboratórios	RDair - Profundidade de rodeira após 10 000 ciclos (mm)			WTSair - Taxa de deformação (mm/10 ³ ciclos)			Baridade (kg/m ³)		
	yi ₁	yi ₂	yi	yi ₁	yi ₂	yi	yi ₁	yi ₂	yi
L1	5,93	6,91	6,42	0,23	0,28	0,26	2359	2352	2356
L2	10,39	10,04	10,22	0,42	0,26	0,34	2360	2353	2357
L3	4,86	3,96	4,41	0,25	0,15	0,20	2356	2351	2354
L4	14,92	16,72	15,82	0,80	0,82	0,81	2362	2363	2363
L5	2,87	3,41	3,14	0,12	0,13	0,13	2372	2368	2370
L6	3,20	4,10	3,65	0,09	0,18	0,14	2371	2377	2374
L7	3,02	2,67	2,85	0,11	0,10	0,11	2362	2369	2366
ANÁLISE ESTATÍSTICA	média das médias:	Y	6,64	média das médias:	Y	0,28	média das médias:	Y	2363
	desvio padrão:	s	4,7900	desvio padrão:	s	0,2457	desvio padrão:	s	7,8
	variância de repetibilidade	sr ²	0,45	variância de repetibilidade	sr ²	0,00	variância de repetibilidade	sr ²	16,07
	variância intralaboratorial	sd ²	45,89	variância intralaboratorial	sd ²	0,12	variância intralaboratorial	sd ²	121,17
	variância interlaboratorial	sL ²	22,72	variância interlaboratorial	sL ²	0,06	variância interlaboratorial	sL ²	52,55
	variância de reprodutibilidade	sR ²	23,17	variância de reprodutibilidade	sR ²	0,06	variância de reprodutibilidade	sR ²	68,62
	coeficiente de variação de repetibilidade	CVr	10,1%	coeficiente de variação de repetibilidade	CVr	20,6%	coeficiente de variação de repetibilidade	CVr	0,2%
	coeficiente de variação de reprodutibilidade	CVR	72,5%	coeficiente de variação de reprodutibilidade	CVR	89,0%	coeficiente de variação de reprodutibilidade	CVR	0,4%
	repetibilidade	r	1,91	repetibilidade	r	0,16	repetibilidade	r	11,35
	reprodutibilidade	R	13,62	reprodutibilidade	R	0,70	reprodutibilidade	R	23,44

Quadro 5.9 – Análise Estatística – Ensaios realizados no âmbito do ECI

- Análise Estatística – Ensaio realizado pelo laboratório Pivot**

Laboratórios	RDair - Profundidade de rodeira após 10 000 ciclos (mm)			WTSair - Taxa de deformação (mm/10 ³ ciclos)			Baridade (kg/m ³)		
	yi ₁	yi ₂	yi	yi ₁	yi ₂	yi	yi ₁	yi ₂	yi
E1	2,87	3,41	3,14	0,12	0,13	0,13	2372	2368	2370
E2	4,68	3,34	4,01	0,17	0,13	0,15	2366	2362	2364
E3	7,18	5,50	6,34	0,31	0,23	0,27	2332	2321	2327
E4	5,55	5,83	5,69	0,23	0,23	0,23	2356	2346	2351
ANÁLISE ESTATÍSTICA	média das médias:	Y	4,80	média das médias:	Y	0,29	média das médias:	Y	2353
	desvio padrão:	s	1,4769	desvio padrão:	s	0,0661	desvio padrão:	s	19,3
	variância de repetibilidade	sr ²	0,62	variância de repetibilidade	sr ²	0,00	variância de repetibilidade	sr ²	31,63
	variância intralaboratorial	sd ²	4,36	variância intralaboratorial	sd ²	0,01	variância intralaboratorial	sd ²	744,13
	variância interlaboratorial	sL ²	1,87	variância interlaboratorial	sL ²	0,00	variância interlaboratorial	sL ²	356,25
	variância de reprodutibilidade	sR ²	2,49	variância de reprodutibilidade	sR ²	0,00	variância de reprodutibilidade	sR ²	387,88
	coeficiente de variação de repetibilidade	CVr	16,5%	coeficiente de variação de repetibilidade	CVr	15,9%	coeficiente de variação de repetibilidade	CVr	0,2%
	coeficiente de variação de reprodutibilidade	CVR	32,9%	coeficiente de variação de reprodutibilidade	CVR	35,0%	coeficiente de variação de reprodutibilidade	CVR	0,8%
	repetibilidade	r	2,23	repetibilidade	r	0,09	repetibilidade	r	15,91
	reprodutibilidade	R	4,47	reprodutibilidade	R	0,20	reprodutibilidade	R	55,74

Quadro 5.10 – Análise Estatística – Ensaio realizado pelo laboratório Pivot

- Análise Estatística – Todos os resultados com exceção do Laboratório 4**

Laboratórios	RDair - Profundidade de rodeira após 10 000 ciclos (mm)			WTSair - Taxa de deformação (mm/10 ³ ciclos)			Baridade (kg/m ³)		
	yi ₁	yi ₂	yi	yi ₁	yi ₂	yi	yi ₁	yi ₂	yi
L1	5,93	6,91	6,42	0,23	0,28	0,26	2359	2352	2356
L2	10,39	10,04	10,22	0,42	0,26	0,34	2360	2353	2357
L3	4,86	3,96	4,41	0,25	0,15	0,20	2356	2351	2354
L5	2,87	3,41	3,14	0,12	0,13	0,13	2372	2368	2370
L6	3,20	4,10	3,65	0,09	0,18	0,14	2371	2377	2374
L7	3,02	2,67	2,85	0,11	0,10	0,11	2362	2369	2366
L5a	4,68	3,34	4,01	0,17	0,13	0,15	2366	2362	2364
L5b	7,18	5,50	6,34	0,31	0,23	0,27	2332	2321	2327
L5c	5,55	5,83	5,69	0,23	0,23	0,23	2356	2346	2351
ANÁLISE ESTATÍSTICA	média das médias:	Y	5,19	média das médias:	Y	0,20	média das médias:	Y	2357
	desvio padrão:	s	2,3032	desvio padrão:	s	0,0775	desvio padrão:	s	14,0
	variância de repetibilidade	sr ²	0,43	variância de repetibilidade	sr ²	0,00	variância de repetibilidade	sr ²	25,61
	variância intralaboratorial	sd ²	10,61	variância intralaboratorial	sd ²	0,01	variância intralaboratorial	sd ²	389,72
	variância interlaboratorial	sL ²	5,09	variância interlaboratorial	sL ²	0,00	variância interlaboratorial	sL ²	182,06
	variância de reprodutibilidade	sR ²	5,52	variância de reprodutibilidade	sR ²	0,01	variância de reprodutibilidade	sR ²	207,67
	coeficiente de variação de repetibilidade	CVr	12,7%	coeficiente de variação de repetibilidade	CVr	27,5%	coeficiente de variação de repetibilidade	CVr	0,2%
	coeficiente de variação de reprodutibilidade	CVR	45,3%	coeficiente de variação de reprodutibilidade	CVR	43,4%	coeficiente de variação de reprodutibilidade	CVR	0,6%
	repetibilidade	r	1,86	repetibilidade	r	0,16	repetibilidade	r	14,32
	reprodutibilidade	R	6,65	reprodutibilidade	R	0,25	reprodutibilidade	R	40,78

Quadro 5.11 – Análise Estatística – Todos os resultados com exceção do Laboratório L4

No Quadro 5.12 pode-se analisar, de uma forma compilada, os valores de fidelidade de medição (repetibilidade e reprodutibilidade) para a taxa de deformação, profundidade de rodeira e baridade dos provetes.

			ECI RELACRE	Ensaio realizado pelo Laboratório PIVOT	Todos os resultados com exceção dos valores obtidos pelo L4
WTSair - Taxa de deformação (mm/103 ciclos)	Repetibilidade	r	0,16	0,09	0,16
	Reprodutibilidade	R	0,70	0,20	0,25
RDair - Profundidade de rodeira após 10 000 ciclos (mm)	Repetibilidade	r	1,91	2,23	1,86
	Reprodutibilidade	R	13,62	4,47	6,65
Baridade (kg/m3)	Repetibilidade	r	11,35	15,91	14,32
	Reprodutibilidade	R	23,44	23,44	40,78

Quadro 5.12 – Valores de fidelidade de medição para os diferentes parâmetros resultantes do ensaio de pista - Wheel-Tracking

Para a **Taxa de deformação**, verifica-se que os menores valores encontrados para a repetibilidade e reprodutibilidade, foram decorrentes do conjunto de ensaios realizados pelo laboratório pivot. Por outro lado, para a **Profundidade de rodeira**, no conjunto de todos os resultados (com exceção dos valores do L4), encontrou-se o menor valor para a repetibilidade (de salientar que os valores para os 3 cenários estão próximos) e para a reprodutibilidade, foi encontrado o menor valor no conjunto dos resultados do laboratório pivot.

Pode-se ainda constatar que para a **Baridade** os valores de fidelidade de medição são bastante mais altos, relativamente aos dois parâmetros anteriores, para as 3 diferentes situações.

Desta forma, podemos verificar que existe uma variabilidade significativa para os resultados obtidos, para a repetibilidade e reprodutibilidade, para os diferentes panoramas. No entanto, como já referido anteriormente, no ponto 3.3 deste trabalho, a norma do ensaio de pista refere que para a mesma propriedade, ensaios realizados em provetes preparados e compactados em laboratório dão frequentemente resultados diferentes dos resultados de ensaios realizados em provetes obtidos a partir da mistura em central e da compactação in-situ. Assim, como também referido no ponto 3.2, o ensaio de pista, como todos os ensaios sobre misturas betuminosas, revelam-se ensaios muito sensíveis. Esta particularidade prende-se essencialmente com a complexidade e forma de rearranjo dos materiais constituintes da mistura betuminosa nos provetes que os contêm, que na realização dos ensaios, podem refletir diferenças de resultados entrando em conflito com as especificações definidas, por exemplo na norma NP EN 13108-1, (I. P. d. Q. IPQ, 2011).

5.4. Análise das fontes de incerteza

A realização de um ensaio, cumprindo determinado método, envolve de facto muitos fatores que podem ser considerados fontes de incerteza. A seguir indicam-se algumas mais comuns:

- Operadores;
- Equipamentos;
- Condições Ambientais;
- Heterogeneidade ou descontinuidades dos materiais.

O capítulo 2 contempla os passos a seguir para a análise das fontes de incerteza, sendo este um objetivo fundamental para obtenção de uma estimativa da incerteza o mais próximo da realidade de cada laboratório.

Identificação das fontes de incerteza:

Depois da análise da metodologia de ensaio presente na EN 12697-22 – Ensaio de Pista (Wheel-Tracking), objeto deste trabalho, as fontes de incerteza que foram consideradas relevantes para a estimativa da incerteza são:

- Exatidão do transdutor capaz de medir a profundidade de rodeira aos 5000 ciclos.
- Exatidão do transdutor capaz de medir a profundidade de rodeira aos 10000+ ciclos.
- Garantia da amplitude do curso relativamente às passagens do pneu sobre a superfície do provete.
- Garantia da frequência dos ciclos relativamente às passagens do pneu sobre a superfície do provete.
- Garantia da espessura da laje para ensaio.
- Equipamento para a garantia do controlo da temperatura do ensaio.
- Mecanismo para garantia da aplicação da carga de ensaio;
- Garantia das características do pneu;
- Repetibilidade – Variância;
- Reprodutibilidade – Variância;
- Exatidão associada ao arredondamento.

Quantificação das fontes de incerteza:

A seguir apresentam-se os quadros com todos os resultados decorrentes da análise para a quantificação das fontes de incerteza para os diferentes panoramas, ou seja, conjuntos de ensaios:

- ECI promovido pela RELACRE, Quadro 5.13.
- ECI promovido pela RELACRE com exceção dos resultados do L4, Quadro 5.14.
- Conjunto de todos os resultados com exceção dos resultados do L4, Quadro 5.15.
- Conjuntos dos resultados obtidos pelo laboratório pivot, Quadro 5.16.
- Conjunto de resultados obtidos pelo laboratório pivot, tendo em conta as fontes de incerteza identificadas dentro da realidade do laboratório pivot, Quadro 5.17.
- Conjunto de resultados obtidos pelo laboratório pivot, tendo em conta as fontes de incerteza identificadas dentro da realidade do laboratório pivot sem considerar os índices de repetibilidade e reprodutibilidade, Quadro 5.18.

Achou-se pertinente estimar a incerteza levando em conta diferentes fatores e verificar qual o resultado que pode ser mais adequado dependendo do objetivo pretendido.

Designação das Fontes de Incerteza	Valor estimado de influência no resultado do ensaio	Unidade	Distribuição	Variancia	Inc Padrão	Coef Sens	Nº G.Lib.
Exatidão do transdutor capaz de medir a profundidade de rodeira aos 5000 ciclos	0,2	mm	R	1,33E-02	1,15E-01	2,00E-01	50
Exatidão do transdutor capaz de medir a profundidade de rodeira aos 10000 ciclos	0,2	mm	R	1,33E-02	1,15E-01	-2,00E-01	50
Garantia da amplitude do curso relativamente às passagens do pneu sobre a superfície do provete	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Garantia da frequência dos ciclos relativamente às passagens do pneu sobre a superfície do provete	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Garantia da espessura da laje para ensaio	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Equipamento para a garantia do controlo da temperatura do ensaio	0,01	mm	R	3,33E-05	5,77E-03	1,00E+00	50
Mecanismo para garantia da aplicação da carga de ensaio	0,01	mm	R	3,33E-05	5,77E-03	1,00E+00	50
Garantia das características do pneu	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Repetibilidade	-	-	R	3,34E-03	5,78E-02	1,00E+00	500000
Reprodutibilidade	-	-	R	6,21E-02	2,49E-01	1,00E+00	500000
Exatidão do arredondamento	0,005	mm	R	8,33E-06	2,89E-03	1,00E+00	500000

Quadro 5.13 – Dados resultantes da quantificação das fontes de incerteza – ECI promovido pela RELACRE

Designação das Fontes de Incerteza	Valor estimado de influência no resultado do ensaio	Unidade	Distribuição	Variancia	Inc Padrão	Coef Sens	Nº G.Lib.
Exatidão do transdutor capaz de medir a profundidade de rodeira aos 5000 ciclos	0,2	mm	R	1,33E-02	1,15E-01	2,00E-01	50
Exatidão do transdutor capaz de medir a profundidade de rodeira aos 10000 ciclos	0,2	mm	R	1,33E-02	1,15E-01	-2,00E-01	50
Garantia da amplitude do curso relativamente às passagens do pneu sobre a superfície do provete	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Garantia da frequência dos ciclos relativamente às passagens do pneu sobre a superfície do provete	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Garantia da espessura da laje para ensaio	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Equipamento para a garantia do controlo da temperatura do ensaio	0,01	mm	R	3,33E-05	5,77E-03	1,00E+00	50
Mecanismo para garantia da aplicação da carga de ensaio	0,01	mm	R	3,33E-05	5,77E-03	1,00E+00	50
Garantia das características do pneu	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Repetibilidade	-	-	R	3,87E-03	6,22E-02	1,00E+00	500000
Reprodutibilidade	-	-	R	9,89E-03	9,95E-02	1,00E+00	500000
Exatidão do arredondamento	0,005	mm	R	8,33E-06	2,89E-03	1,00E+00	500000

Quadro 5.14 – Dados resultantes da quantificação das fontes de incerteza – ECI promovido pela RELACRE com exceção dos resultados do L4

Designação das Fontes de Incerteza	Valor estimado de influência no resultado do ensaio	Unidade	Distribuição	Variancia	Inc Padrão	Coef Sens	Nº G.Lib.
Exatidão do transdutor capaz de medir a profundidade de rodeira aos 5000 ciclos	0,2	mm	R	1,33E-02	1,15E-01	2,00E-01	50
Exatidão do transdutor capaz de medir a profundidade de rodeira aos 10000 ciclos	0,2	mm	R	1,33E-02	1,15E-01	-2,00E-01	50
Garantia da amplitude do curso relativamente às passagens do pneu sobre a superfície do provete	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Garantia da frequência dos ciclos relativamente às passagens do pneu sobre a superfície do provete	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Garantia da espessura da laje para ensaio	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Equipamento para a garantia do controlo da temperatura do ensaio	0,01	mm	R	3,33E-05	5,77E-03	1,00E+00	50
Mecanismo para garantia da aplicação da carga de ensaio	0,01	mm	R	3,33E-05	5,77E-03	1,00E+00	50
Garantia das características do pneu	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Repetibilidade	-	-	R	3,02E-03	5,50E-02	1,00E+00	500000
Reprodutibilidade	-	-	R	7,52E-03	8,67E-02	1,00E+00	500000
Exatidão do arredondamento	0,005	mm	R	8,33E-06	2,89E-03	1,00E+00	500000

Quadro 5.15 – Dados resultantes da quantificação das fontes de incerteza – Conjunto de todos os resultados com exceção dos resultados do L4

Designação das Fontes de Incerteza	Valor estimado de influência no resultado do ensaio	Unidade	Distribuição	Variancia	Inc Padrão	Coef Sens	Nº G.Lib.
Exatidão do transdutor capaz de medir a profundidade de rodeira aos 5000 ciclos	0,2	mm	R	1,33E-02	1,15E-01	2,00E-01	50
Exatidão do transdutor capaz de medir a profundidade de rodeira aos 10000 ciclos	0,2	mm	R	1,33E-02	1,15E-01	-2,00E-01	50
Garantia da amplitude do curso relativamente às passagens do pneu sobre a superfície do provete	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Garantia da frequência dos ciclos relativamente às passagens do pneu sobre a superfície do provete	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Garantia da espessura da laje para ensaio	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Equipamento para a garantia do controlo da temperatura do ensaio	0,01	mm	R	3,33E-05	5,77E-03	1,00E+00	50
Mecanismo para garantia da aplicação da carga de ensaio	0,01	mm	R	3,33E-05	5,77E-03	1,00E+00	50
Garantia das características do pneu	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Repetibilidade	-	-	R	1,01E-03	3,18E-02	1,00E+00	500000
Reprodutibilidade	-	-	R	4,91E-03	7,00E-02	1,00E+00	500000
Exatidão do arredondamento	0,005	mm	R	8,33E-06	2,89E-03	1,00E+00	500000

Quadro 5.16 – Dados resultantes da quantificação das fontes de incerteza – Conjuntos dos resultados obtidos pelo laboratório pivot

Designação das Fontes de Incerteza	Valor estimado de influência no resultado do ensaio	Unidade	Distribuição	Variancia	Inc Padrão	Coef Sens	Nº G.Lib.
Exatidão do transdutor capaz de medir a profundidade de rodeira aos 5000 ciclos	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	2,00E-01	50
Exatidão do transdutor capaz de medir a profundidade de rodeira aos 10000 ciclos	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	-2,00E-01	50
Equipamento para a garantia do controlo da temperatura do ensaio	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Mecanismo para garantia da aplicação da carga de ensaio	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Garantia das características do pneu	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Repetibilidade	-	mm	R	1,01E-03	3,18E-02	1,00E+00	500000
Reprodutibilidade	-	mm	R	4,91E-03	7,00E-02	1,00E+00	500000
Exatidão do arredondamento	0,005	mm	R	8,33E-06	2,89E-03	1,00E+00	500000

Quadro 5.17 – Dados resultantes da quantificação das fontes de incerteza – Conjunto dos resultados obtidos pelo laboratório pivot com fontes de incerteza identificadas tendo em conta a realidade do laboratório pivot

Designação das Fontes de Incerteza	Valor estimado de influência no resultado do ensaio	Unidade	Distribuição	Variancia	Inc Padrão	Coef Sens	Nº G.Lib.
Exatidão do transdutor capaz de medir a profundidade de rodeira aos 5000 ciclos	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	2,00E-01	50
Exatidão do transdutor capaz de medir a profundidade de rodeira aos 10000 ciclos	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	-2,00E-01	50
Equipamento para a garantia do controlo da temperatura do ensaio	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Mecanismo para garantia da aplicação da carga de ensaio	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Garantia das características do pneu	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Exactidão do arredondamento	0,005	mm	R	8,33E-06	2,89E-03	1,00E+00	500000

Quadro 5.18 – Dados resultantes da quantificação das fontes de incerteza – Conjunto dos resultados obtidos pelo laboratório pivot com fontes de incerteza identificadas tendo em conta a realidade do laboratório pivot sem considerar os índices de repetibilidade e reprodutibilidade

5.5. Resultados obtidos para a estimativa da incerteza para o ensaio de pista – Wheel-Tracking

De acordo com a metodologia de cálculo da incerteza já descrita no capítulo 2 “A incerteza em ensaios e metodologia da sua avaliação” apresentam-se, no Quadro 5.19, os resultados obtidos:

INCERTEZAS – TAXA DE DEFORMAÇÃO (mm/10 ³ ciclos)	
ECI promovido pela RELACRE	0.427
ECI promovido pela RELACRE com exceção dos resultados do L4	0.203
Conjunto de todos os resultados com exceção dos resultados do L4	0.180
Conjunto de resultados obtidos pelo laboratório pivot	0.140
Conjunto de resultados obtidos pelo laboratório pivot, tendo em conta as fontes de incerteza identificadas dentro da realidade do laboratório pivot	0.129
Conjunto de resultados obtidos pelo laboratório pivot, tendo em conta as fontes de incerteza identificadas dentro da realidade do laboratório pivot sem considerar os índices de repetibilidade e reprodutibilidade	0.018

Quadro 5.19 – Resumo do cálculo das estimativas da incerteza

No anexo deste trabalho, apresentam-se todos os dados resultantes do respetivo cálculo, para os diferentes casos:

- ECI promovido pela RELACRE;
- ECI promovido pela RELACRE com exceção dos resultados do L4;
- Conjunto de todos os resultados com exceção dos resultados do L4;
- Conjuntos de resultados obtidos pelo laboratório pivot;
- Conjunto de resultados obtidos pelo laboratório pivot, tendo em conta as fontes de incerteza identificadas dentro da realidade do laboratório pivot;
- Conjunto de resultados obtidos pelo laboratório pivot, tendo em conta as fontes de incerteza identificadas dentro da realidade do laboratório pivot sem considerar os índices de repetibilidade e reprodutibilidade.

5.6. Reflexão da metodologia adotada e dos resultados obtidos

Concluiu-se que quanto mais controlo se tem nas fontes de incerteza, maior é a possibilidade de se obter uma incerteza menor.

Foram estimadas diferentes incertezas tendo em conta fatores diferentes, isto é, dependendo da origem dos dados e do conhecimento que se tem dos meios utilizados para a realização do ensaio, o rigor com que se define as fontes de incerteza é maior.

Os valores de fidelidade de medição (repetibilidade r e reprodutibilidade R) são fatores muito importantes e determinantes para uma estimativa de incerteza mais rigorosa. Foi possível verificar que a incerteza estimada para o ensaio de pista, considerando o conjunto de resultados obtidos pelo laboratório pivot tendo em conta a repetibilidade e reprodutibilidade, é maior do que o valor estimado não contemplando a repetibilidade e reprodutibilidade, como se pode observar no Quadro 5.19. Esta diferença já era prevista, no entanto verificou-se que a diferença é significativa para ser ignorada no cálculo de uma incerteza.

Desta forma achou-se relevante que o cálculo da incerteza de um ensaio deve ter em conta estes valores de fidelidade de medição já que assim para quem precisa dos resultados dos ensaios possa ter a informação essencial para análise do trabalho em que está envolvido.

A metodologia adotada foi essencialmente baseada numa análise aprofundada das fontes de incerteza que podem influenciar os resultados dos ensaios, dependendo do facto de que quem está a estimar a incerteza tem conhecimento e controlo de todos os fatores que podem influenciar os resultados.

Por exemplo, o facto de estimar uma incerteza de resultados obtidos de ensaios em laboratórios diferentes faz com que haja um aumento na possibilidade da existência de fatores que influenciem o resultado, já que não é possível para a mesma pessoa acompanhar todos os passos, desde a distribuição das amostras até ao final da execução do ensaio, não podendo, assim, haver evidências de que todos os laboratórios tiveram exatamente as mesmas práticas.

Como se pode observar no Quadro 5.19 foram determinados diferentes valores para a incerteza, dependendo do conjunto de ensaios utilizado e dos valores da repetibilidade e reprodutibilidade, sendo que a precisão ou fidelidade de medição é um fator essencial da incerteza total.

6. Considerações finais

6.1. Síntese do trabalho

Este trabalho surgiu da necessidade da obtenção de uma metodologia rigorosa para o cálculo da incerteza para o ensaio de pista Wheel-Tracking, a misturas betuminosas, recorrendo também a análise de resultados de repetibilidade e reprodutibilidade do ensaio.

No desenvolvimento da presente tese foi primeiramente efetuada uma análise aprofundada do ensaio de pista – “Wheel-Tracking” – definido na norma EN 12697-22. O trabalho foi iniciado por uma fase de recolha de dados para se proceder à estimativa da incerteza para o ensaio de pista – “Wheel-Tracking”. Esses dados foram conseguidos decorrente de uma colaboração com a RELACRE na organização e tratamento de dados relativamente ao Ensaio de Comparação Interlaboratorial.

Com a cooperação da empresa Gabriel Couto foi organizado um trecho experimental de forma a obter os provetes para realização do ECI, cuja proveniência foi uma mistura betuminosa densa, AC14Reg/Bin 35/50 (BBsb), aplicada na obra de construção da A3 – Auto-Estrada Porto/Valença (Sublanço Maia / Santo Tirso).

Após recolha e distribuição dos provetes os laboratórios participantes foi efetuada a análise estatística em cooperação com a RELACRE utilizando a metodologia praticada pela mesma. Decorrente desta análise, foi possível analisar o desempenho dos laboratórios participantes através do cálculo do indicador de desempenho – Z-Score.

Na fase seguinte, foi realizada uma análise exploratória recorrendo ao programa informático SPSS. Nesta fase achou-se pertinente analisar apenas os parâmetros baridade dos provetes e profundidade de rodeira por provete de forma a estudar o comportamento do material em causa e apurar a existência de resultados duvidosos. Esta análise exploratória teve em consideração os resultados do ECI promovido pela RELACRE mais resultados extras obtidos pelo laboratório piloto da mesma mistura produzida para o ECI. Através da ferramenta SPSS foi possível ainda fazer testes de normalidade e Comparações Múltiplas utilizando o Teste LSD – Comparação Múltipla de médias das ordens a partir de amostras independentes.

Depois foram determinados os valores de fidelidade de medição: repetibilidade e reprodutibilidade para os diferentes cenários apresentados.

A definição das fontes de incerteza foi o passo seguinte, passo este fulcral para o trabalho presente. Nesta fase foi importante encontrar as fontes de incerteza adequada a cada situação apresentada.

Finalmente, procedeu-se à estimativa da incerteza de forma a validar a metodologia estabelecida.

6.2. Principais conclusões

No caso da preparação dos provetes para o ECI do ensaio de pista (“Wheel-Tracking”), foi possível concluir que os provetes recolhidos in-situ, são mais suscetíveis a diferenças de características, que os materiais constituintes, da mistura betuminosa, podem sofrer durante o processamento das várias fases de produção e aplicação por que têm de passar.

A própria natureza do agregado (um dos materiais constituinte), pode ser uma causa para resultados diferentes.

O facto de não existirem critérios especificados para limites de valores para a taxa de deformação para cada tipo de mistura, tornou a análise de resultados ambígua.

Verificaram-se diferenças na baridade dos provetes o que influencia os resultados para a determinação da taxa de deformação.

A realização dos provetes em laboratório, para a realização de um ECI, diminui a probabilidade de diferenças das características dos provetes a ensaiar. No entanto, não se pode controlar o acondicionamento dos provetes após saída do laboratório pivot.

Pensa-se que o acondicionamento inadequado, foi de facto uma causa para a diferença de resultados que se apresentaram.

Foi possível evidenciar este facto na forma inadequada que alguns laboratórios demonstraram, no tratamento dos provetes na fase do levantamento dos mesmos no laboratório pivot, refletindo-se na forma de como transportaram as amostras para os seus respetivos locais.

Conclui-se que os valores encontrados para a incerteza associada ao ensaio de pista é de facto um valor grande face a grandeza do resultado do ensaio.

A definição das fontes de incerteza são um ponto determinante para a estimativa da incerteza, que deve ser avaliada caso a caso. No caso de laboratório pretender estimar uma incerteza através de ensaios realizados apenas no seu laboratório, as fontes de incerteza são determinadas com mais precisão e confiança.

Se se pretender estimar uma incerteza baseada num ECI, o leque das fontes de incerteza aumenta, já que aumentam as diferenças, como por exemplo os equipamentos são diferentes, a garantia das condições de ensaio diminui, etc.

Verificou-se que os componentes que mais influenciam a incerteza são a repetibilidade e a reprodutibilidade das medições. A repetibilidade e reprodutibilidade são valores de fidelidade que refletem as diferenças anteriormente referidas e assim devem ser tidos em conta para o cálculo da incerteza como fontes de incerteza.

6.3. Propostas / recomendações futuras

Recomenda-se que para a realização do ECI de pista – Wheel-Tracking, de forma a garantir uma maior homogeneidade das propriedades/características dos provetes, a fabricação, dos mesmos, deve ser efetuada em laboratório. Ainda relativamente à participação em ECI's, seria uma mais-valia, para os organizadores e participantes, que se efetuasse uma verificação da existência de um know-how suficiente dos participantes, que se concretizaria numa confirmação se o pessoal participante possuía experiência e formação adequadas e se os equipamentos cumpriam os requisitos necessários.

As normas de ensaio/especificações/procedimentos deveriam ser sem ambiguidades e deveriam ser claras o suficiente, de forma a garantir que os resultados são independentes do laboratório e pessoal.

Sugere-se especificar, a nível nacional, metodologia para estimar a incerteza associada aos ensaios de materiais de construção, a ser seguida obrigatoriamente pelos laboratórios acreditados. Esta metodologia deveria definir as fontes de incerteza, e ter em conta para o cálculo da incerteza a repetibilidade e reprodutibilidade, valores estes apurados por cada laboratório.

Sugere-se que no caso de inexistência de uma metodologia a ser cumprida pelos laboratórios acreditados, tornar o guia da RELACRE, já existente, num documento a ser seguido por todos os laboratórios participantes nos ECIS, programados pela mesma. Este guia deveria contemplar todos os ensaios promovidos pela entidade responsável.

Este estudo serviu também para confirmar a percepção, que já se tinha, que o ensaio de pista é um ensaio muito suscetível, o que leva a sugerir-se que se analise a pertinência de um estudo mais profundo acerca da forma de execução deste ensaio e recolha das amostras.

Por exemplo, quando a norma prevê a realização do ensaio em amostras recolhidas de um pavimento, refletir nas repercussões que podem advir do modo como se efetua esse trabalho, e dessa forma influenciarem nos resultados dos ensaios.

Bibliografia

- Pestana, M. H., & Gageiro, J. (2005). Análise de dados para ciências Sociais. A Complementaridade do SPSS (E. Sílabo Ed. 4ª ed.).
- Brisa. (2013). Caderno de encargos - Cláusula Técnicas Especiais - Empreitada para as obras de beneficiação / reforço do pavimento, no sublanço Coimbra sul / Coimbra norte da A1 – Auto-estrada do norte.
- CEN, EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. (2007). EN 12697-22:2003+A1 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22: Wheel tracking.
- CTR09, Comissão técnica RELACRE. (2013). Guia RELACRE 25 - Estimativa da Incerteza de Medição em Ensaios de Materiais de Construção (RELACRE Ed. 1ª ed.).
- EA, European co-operation for Accreditation. (2003). EA-4/16 - EA guidelines on the expression of uncertainty in quantitative testing (Rev00 ed.).
- Gardete, D., Picado-Santos, L.G., Pais, J.C., & Luzia, R. (2008). Ensaios laboratoriais para caracterização de misturas betuminosas à deformação permanente: Universidade do Minho (CN-39).
- Homerich da Jornada, D., & Caten, C. (2007). Uma revisão sobre abordagens e métodos de cálculo de incerteza. Paper presented at the V Congresso Latino Americano de Metrologia, Brasil. file:///C:/Users/Catarina%20Lopes/Downloads/art_19%20(1).pdf
- Homerich da Jornada, D., & Homerich da Jornada, F. (2007). Cálculo de incerteza de medição: Estudo comparativo entre os métodos do GUM, de Monte Carlo e de Integração Numérica. Paper presented at the ENQUALAB-2007 - Congresso da Qualidade em Metrologia, Brasil. <http://www.chasqueweb.ufrgs.br/~valner.brusamarello/comp2.pdf>
- IPQ. (2005). NP EN ISO/IEC 17025: 2005 Requisitos gerais para laboratórios de ensaio e calibração.
- IPQ, Instituto Português da Qualidade. (2008). NP EN 13108-20 Misturas betuminosas Especificações dos materiais Parte 20: Ensaio de Tipo: IPQ.
- IPQ, Instituto Português da Qualidade. (2011). NP EN 13108-1 2011 Misturas betuminosas- Especificações dos materiais- Parte 1: Betão betuminoso

- IPQ, Instituto Português da Qualidade. (2012). Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM) (IPQ Ed. 1ª edição Luso-Brasileira ed.).
- ISO. (1995). Guide to the expression of uncertainty in measurement.
- Maroco, João. (2010). Análise estatística com utilização do SPSS (E. Sílabo Ed. 3ª edição ed.).
- Pestana, M. H., & Gageiro, J. (2005). Análise de dados para ciências Sociais. A Complementaridade do SPSS (E. Sílabo Ed. 4ª ed.).
- Ramos Pinto, R. (2009). Introdução à Análise de Dados com Recurso ao SPSS (E. Sílabo Ed. 1ª ed.).
- Sousa, J.A., Reynolds, A.P., Delgado, I.S., Marques, J.C., Teixeira, L.M., & Jesus, C.G. (2007). Estudo comparativo de diferentes métodos na avaliação de incertezas de medição em metrologia química. Paper presented at the Metrologia e Inovação - 2ª Conferência Nacional, Madeira.
http://www.spmet.pt/Eventos/Conferencia2/Incertezas_met_quim_JSousa_et_al.pdf

Referências bibliográficas

- Pizzolato, M., Schwengber ten Caten, C., & Alziro Herz da Jornada, J. (2008). A influência do sistema de gestão de laboratórios nos resultados dos ensaios de proficiência da construção civil. <http://www.scielo.br/pdf/gp/v15n3/11.pdf>
- Souza, Fábio. Estimativa da incerteza de medição. Uma abordagem prática. <http://www.luisborges.com.br/ESTIMATIVA%20DA%20INCERTEZA.pdf>
- Pires Moreiras, Cláudia Isabel. (2005). Análise de incertezas em ensaios de qualidade. (Mestrado em estatística aplicada e modelação), Universidade do Porto. Retrieved from <http://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/57754/2/Texto%20integral.pdf>
- International Organization for Standardization. (1980). ISO 2602 Statistical interpretation of test results - Estimation of the mean - Confidence interval". International Organization for Standardization. Genève.
- International Organization for Standardization. (1994a). ISO 5725 Accuracy (trueness and precision) of a measurement methods and results - Part 2: basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method. Genève.
- International Organization for Standardization. (1994b). ISO 5725, Accuracy (trueness and precision) of a measurement methods and results - Part 3: Intermediate measures of the precision of a standard and measurement method, Genève.
- International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission. (2010). ISO/IEC 17043 Conformity assessment - General requirements for proficiency testing.

ANEXOS– Estimativa da incerteza para o ensaio de pista – Wheel-Tracking

Designação das Fontes de Incerteza	Valor estimado de influência no resultado do ensaio	Unidade	Distribuição	Variancia	Inc Padrão	Coef Sens	Nº G.Lib.
Exatidão do transdutor capaz de medir a profundidade de rodeira aos 5000 ciclos	0,2	mm	R	1,33E-02	1,15E-01	2,00E-01	50
Exatidão do transdutor capaz de medir a profundidade de rodeira aos 10000 ciclos	0,2	mm	R	1,33E-02	1,15E-01	-2,00E-01	50
Garantia da amplitude do curso relativamente às passagens do pneu sobre a superfície do provete	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Garantia da frequência dos ciclos relativamente às passagens do pneu sobre a superfície do provete	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Garantia da espessura da laje para ensaio	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Equipamento para a garantia do controlo da temperatura do ensaio	0,01	mm	R	3,33E-05	5,77E-03	1,00E+00	50
Mecanismo para garantia da aplicação da carga de ensaio	0,01	mm	R	3,33E-05	5,77E-03	1,00E+00	50
Garantia das características do pneu	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Repetibilidade	-	-	R	3,34E-03	5,78E-02	1,00E+00	500000
Reprodutibilidade	-	-	R	6,21E-02	2,49E-01	1,00E+00	500000
Exatidão do arredondamento	0,005	mm	R	8,33E-06	2,89E-03	1,00E+00	500000
<p>Incerteza Padrão = 0,2580</p> <p>Nº Graus Liberdade = 231 255 Incerteza Expandida = ± 0,516 mm/10³ ciclos</p> <p>Factor Expansão [K] = 2,000</p>							
Designação das Fontes de Incerteza	Valor estimado de influência no resultado do ensaio	Unidade	Distribuição	Variancia	Inc Padrão	Coef Sens	Nº G.Lib.
Ensaio 1	0,516	mm	R	8,88E-02	2,98E-01	5,00E-01	50
Ensaio 2	0,516	mm	R	8,88E-02	2,98E-01	5,00E-01	50
Diferença de valores	0,015	mm	R	7,50E-05	8,66E-03	1,00E+00	500000
<p>Incerteza Padrão = 0,2108</p> <p>Nº Graus Liberdade = 100 Incerteza Expandida = ± 0,427 mm/10³ ciclos</p> <p>Factor Expansão [K] = 2,025</p>							

Quadro 6.1 – Estimativa da incerteza – ECI promovido pela RELACRE

Designação das Fontes de Incerteza	Valor estimado de influência no resultado do ensaio	Unidade	Distribuição	Variancia	Inc Padrão	Coef Sens	Nº G.Lib.
Exatidão do transdutor capaz de medir a profundidade de rodeira aos 5000 ciclos	0,2	mm	R	1,33E-02	1,15E-01	2,00E-01	50
Exatidão do transdutor capaz de medir a profundidade de rodeira aos 10000 ciclos	0,2	mm	R	1,33E-02	1,15E-01	-2,00E-01	50
Garantia da amplitude do curso relativamente às passagens do pneu sobre a superfície do provete	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Garantia da frequência dos ciclos relativamente às passagens do pneu sobre a superfície do provete	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Garantia da espessura da laje para ensaio	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Equipamento para a garantia do controlo da temperatura do ensaio	0,01	mm	R	3,33E-05	5,77E-03	1,00E+00	50
Mecanismo para garantia da aplicação da carga de ensaio	0,01	mm	R	3,33E-05	5,77E-03	1,00E+00	50
Garantia das características do pneu	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Repetibilidade	-	-	R	3,87E-03	6,22E-02	1,00E+00	500000
Reprodutibilidade	-	-	R	9,89E-03	9,95E-02	1,00E+00	500000
Exatidão do arredondamento	0,005	mm	R	8,33E-06	2,89E-03	1,00E+00	500000

Incerteza Padrão = 0,1221

Nº Graus Liberdade = 19 067

Incerteza Expandida = $\pm 0,244 \text{ mm}/10^3 \text{ ciclos}$

Factor Expansão [K] = 2,000

Designação das Fontes de Incerteza	Valor estimado de influência no resultado do ensaio	Unidade	Distribuição	Variancia	Inc Padrão	Coef Sens	Nº G.Lib.
Ensaio 1	0,244	mm	R	1,98E-02	1,41E-01	5,00E-01	50
Ensaio 2	0,244	mm	R	1,98E-02	1,41E-01	5,00E-01	50
Diferença de valores	0,015	mm	R	7,50E-05	8,66E-03	1,00E+00	500000
Incerteza Padrão = 0,1000							
Nº Graus Liberdade = 101							
Factor Expansão [K] = 2,025							
Incerteza Expandida = $\pm 0,203 \text{ mm}/10^3 \text{ ciclos}$							

Quadro 6.2 – Estimativa da incerteza – ECI promovido pela RELACRE com exceção dos resultados do L4

Designação das Fontes de Incerteza	Valor estimado de influência no resultado do ensaio	Unidade	Distribuição	Variancia	Inc Padrão	Coef Sens	Nº G.Lib.
Exatidão do transdutor capaz de medir a profundidade de rodeira aos 5000 ciclos	0,2	mm	R	1,33E-02	1,15E-01	2,00E-01	50
Exatidão do transdutor capaz de medir a profundidade de rodeira aos 10000 ciclos	0,2	mm	R	1,33E-02	1,15E-01	-2,00E-01	50
Garantia da amplitude do curso relativamente às passagens do pneu sobre a superfície do provete	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Garantia da frequência dos ciclos relativamente às passagens do pneu sobre a superfície do provete	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Garantia da espessura da laje para ensaio	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Equipamento para a garantia do controlo da temperatura do ensaio	0,01	mm	R	3,33E-05	5,77E-03	1,00E+00	50
Mecanismo para garantia da aplicação da carga de ensaio	0,01	mm	R	3,33E-05	5,77E-03	1,00E+00	50
Garantia das características do pneu	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Repetibilidade	-	-	R	3,02E-03	5,50E-02	1,00E+00	500000
Reprodutibilidade	-	-	R	7,52E-03	8,67E-02	1,00E+00	500000
Exatidão do arredondamento	0,005	mm	R	8,33E-06	2,89E-03	1,00E+00	500000
Incerteza Padrão = 0,1081							
Nº Graus Liberdade = 11 825			Incerteza Expandida = ± 0,216 mm/10 ³ ciclos				
Factor Expansão [K] = 2,000							
Designação das Fontes de Incerteza	Valor estimado de influência no resultado do ensaio	Unidade	Distribuição	Variancia	Inc Padrão	Coef Sens	Nº G.Lib.
Ensaio 1	0,216	mm	R	1,56E-02	1,25E-01	5,00E-01	50
Ensaio 2	0,216	mm	R	1,56E-02	1,25E-01	5,00E-01	50
Diferença de valores	0,015	mm	R	7,50E-05	8,66E-03	1,00E+00	500000
Incerteza Padrão = 0,0886							
Nº Graus Liberdade = 101			Incerteza Expandida = ± 0,180 mm/10 ³ ciclos				
Factor Expansão [K] = 2,025							

Quadro 6.3 – Estimativa da incerteza – Conjunto de todos os resultados com exceção dos resultados do L4

Designação das Fontes de Incerteza	Valor estimado de influência no resultado do ensaio	Unidade	Distribuição	Variancia	Inc Padrão	Coef Sens	Nº G.Lib.
Exatidão do transdutor capaz de medir a profundidade de rodeira aos 5000 ciclos	0,2	mm	R	1,33E-02	1,15E-01	2,00E-01	50
Exatidão do transdutor capaz de medir a profundidade de rodeira aos 10000 ciclos	0,2	mm	R	1,33E-02	1,15E-01	-2,00E-01	50
Garantia da amplitude do curso relativamente às passagens do pneu sobre a superfície do provete	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Garantia da frequência dos ciclos relativamente às passagens do pneu sobre a superfície do provete	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Garantia da espessura da laje para ensaio	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Equipamento para a garantia do controlo da temperatura do ensaio	0,01	mm	R	3,33E-05	5,77E-03	1,00E+00	50
Mecanismo para garantia da aplicação da carga de ensaio	0,01	mm	R	3,33E-05	5,77E-03	1,00E+00	50
Garantia das características do pneu	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Repetibilidade	-	-	R	1,01E-03	3,18E-02	1,00E+00	500000
Reprodutibilidade	-	-	R	4,91E-03	7,00E-02	1,00E+00	500000
Exatidão do arredondamento	0,005	mm	R	8,33E-06	2,89E-03	1,00E+00	500000
Incerteza Padrão = 0,0840							
Nº Graus Liberdade = 4 346							
Incerteza Expandida = $\pm 0,168 \text{ mm}/10^3 \text{ ciclos}$							
Factor Expansão [K] = 2,001							
Designação das Fontes de Incerteza	Valor estimado de influência no resultado do ensaio	Unidade	Distribuição	Variancia	Inc Padrão	Coef Sens	Nº G.Lib.
Ensaio 1	0,168	mm	R	9,41E-03	9,70E-02	5,00E-01	50
Ensaio 2	0,168	mm	R	9,41E-03	9,70E-02	5,00E-01	50
Diferença de valores	0,015	mm	R	7,50E-05	8,66E-03	1,00E+00	500000
Incerteza Padrão = 0,2108							
Nº Graus Liberdade = 100							
Incerteza Expandida = $\pm 0,140 \text{ mm}/10^3 \text{ ciclos}$							
Factor Expansão [K] = 2,025							

Quadro 6.4 – Estimativa da incerteza – Conjunto de resultados obtidos pelo laboratório pivot

Designação das Fontes de Incerteza	Valor estimado de influência no resultado do ensaio	Unidade	Distribuição	Variancia	Inc Padrão	Coef Sens	Nº G.Lib.
Exatidão do transdutor capaz de medir a profundidade de rodeira aos 5000 ciclos	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	2,00E-01	50
Exatidão do transdutor capaz de medir a profundidade de rodeira aos 10000 ciclos	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	-2,00E-01	50
Equipamento para a garantia do controlo da temperatura do ensaio	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Mecanismo para garantia da aplicação da carga de ensaio	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Garantia das características do pneu	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Repetibilidade	-	mm	R	1,01E-03	3,18E-02	1,00E+00	500000
Reprodutibilidade	-	mm	R	4,91E-03	7,00E-02	1,00E+00	500000
Exatidão do arredondamento	0,005	mm	R	8,33E-06	2,89E-03	1,00E+00	500000
Incerteza Padrão = 0,0770							
Nº Graus Liberdade = 700 051				Incerteza Expandida = ± 0,154 mm/10 ³ ciclos			
Factor Expansão [K] = 2,000							
Designação das Fontes de Incerteza	Valor estimado de influência no resultado do ensaio	Unidade	Distribuição	Variancia	Inc Padrão	Coef Sens	Nº G.Lib.
Ensaio 1	0,154	mm	R	7,91E-03	8,89E-02	5,00E-01	50
Ensaio 2	0,154	mm	R	7,91E-03	8,89E-02	5,00E-01	50
Diferença de valores	0,015	mm	R	7,50E-05	8,66E-03	1,00E+00	500000
Incerteza Padrão = 0,0635							
Nº Graus Liberdade = 103				Incerteza Expandida = ± 0,129 mm/10 ³ ciclos			
Factor Expansão [K] = 2,025							

Quadro 6.5 – Estimativa da incerteza – Conjunto de resultados obtidos pelo laboratório pivot, tendo em conta as fontes de incerteza identificadas dentro da realidade do laboratório pivot

Designação das Fontes de Incerteza	Valor estimado de influência no resultado do ensaio	Unidade	Distribuição	Variancia	Inc Padrão	Coef Sens	Nº G.Lib.
Exatidão do transdutor capaz de medir a profundidade de rodeira aos 5000 ciclos	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	2,00E-01	50
Exatidão do transdutor capaz de medir a profundidade de rodeira aos 10000 ciclos	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	-2,00E-01	50
Equipamento para a garantia do controlo da temperatura do ensaio	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Mecanismo para garantia da aplicação da carga de ensaio	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Garantia das características do pneu	0,001	mm	R	3,33E-07	5,77E-04	1,00E+00	50
Exactidão do arredondamento	0,005	mm	R	8,33E-06	2,89E-03	1,00E+00	500000

Incerteza Padrão = 0,0031

Nº Graus Liberdade = 12 859

Incerteza Expandida = $\pm 0,006 \text{ mm}/10^3 \text{ ciclos}$

Factor Expansão [K] = 2,000

Designação das Fontes de Incerteza	Valor estimado de influência no resultado do ensaio	Unidade	Distribuição	Variancia	Inc Padrão	Coef Sens	Nº G.Lib.
Ensaio 1	0,006	mm	R	1,20E-05	3,46E-03	5,00E-01	50
Ensaio 2	0,006	mm	R	1,20E-05	3,46E-03	5,00E-01	50
Diferença de valores	0,015	mm	R	7,50E-05	8,66E-03	1,00E+00	500000
Incerteza Padrão = 0,0090							
Nº Graus Liberdade = 17 672				Incerteza Expandida = ± 0,018 mm/10³ ciclos			
Factor Expansão [K] = 2,000							

Quadro 6.6 – Estimativa da incerteza – Conjunto de resultados obtidos pelo laboratório pivot, tendo em conta as fontes de incerteza identificadas dentro da realidade do laboratório pivot sem considerar os índices de repetibilidade e reprodutibilidade